

Évaluation en laboratoire de l'influence d'utiliser de forts taux de granulats bitumineux récupérés dans les enrobés à chaud

par

Marc-André BÉRUBÉ

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTRÉAL, LE 29 AOÛT 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Marc-André Bérubé, 2024



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Alan Carter, directeur de thèse
Département de Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

M. Kevin Bilodeau, codirecteur de thèse
Direction recherche et développement, Bauval Inc.

M. Hakim Bouzid, président du jury
Département de Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Perraton, membre du jury
Département de Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

M. Simon Pouget, examinateur externe
Directeur de recherche et innovation chez Eiffage infrastructure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 8 JUILLET 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mes parents, Sylvie et Jean-Yves, pour leur soutien fidèle tout au long de ces années. Leur foi en moi, leur encouragement constant dans mes choix, qu'ils les approuvent ou non, ont été des piliers dans mon parcours. Un merci tout spécial à mon frère, Maxime, qui a su incarner avec grâce son rôle tout au long de mon parcours. Son soutien fraternel a été un cadeau inestimable.

Je suis également infiniment reconnaissant envers ma conjointe, Marie-Eve, qui a été un roc à mes côtés, dans les moments de joie comme dans les épreuves. Sa présence a été une source constante de force et d'inspiration. Merci Budy, Stella et surtout Lily.

Je tiens à remercier chaleureusement toute l'équipe du Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB), notamment Francis, Sylvain, Sébastien et Gabriel. Leur partage de connaissances et les discussions enrichissantes que nous avons eues ont grandement contribué à l'épanouissement de ma démarche scientifique. Enfin, mes sincères remerciements vont à mon directeur de thèse et à mon codirecteur, dont les conseils avisés, la guidance éclairée et le soutien sans faille m'ont permis d'atteindre les objectifs que je me suis fixés et de m'amener là où je suis aujourd'hui.

Évaluation en laboratoire de l'influence d'utiliser de forts taux de granulats bitumineux récupérés dans les enrobés à chaud

Marc-André BÉRUBÉ

RÉSUMÉ

La dépendance significative du Canada à son réseau routier pour le transport de marchandises et de personnes met en évidence l'importance cruciale de maintenir ces infrastructures dans les meilleures conditions possible. Cette thèse explore l'utilisation des granulats bitumineux récupérés (GBR) dans la construction et la réhabilitation des chaussées, une approche prometteuse pour optimiser à la fois les coûts et l'empreinte environnementale de ces infrastructures essentielles. Malgré leurs avantages significatifs en termes de réduction des coûts et d'impact écologique, l'incorporation de GBR dans les enrobés à des pourcentages élevés est limitée par un manque de données confirmatives concernant leur comportement à long terme, particulièrement sous les contraintes du climat rigoureux canadien.

Cette recherche doctorale vise à combler cette lacune en développant des enrobés contenant un pourcentage élevé de GBR et en évaluant de manière approfondie leur performance en laboratoire. Le programme expérimental s'articule autour de trois axes principaux : premièrement, une étude détaillée de la caractérisation des GBR pour comprendre leur composition et leurs propriétés physiques; deuxièmement, une analyse de l'impact du type de malaxeur et du temps de malaxage sur les propriétés volumétriques et la performance des enrobés; et troisièmement, une évaluation de la performance des enrobés contenant différents pourcentages de GBR, en se concentrant spécifiquement sur la mobilisation du bitume recyclé et son interaction avec le bitume neuf. Les résultats expérimentaux, présentés dans cette thèse sous forme d'articles scientifiques, ont démontré que, bien que l'incorporation de GBR à des taux élevés présente des défis, en termes d'augmentation de la fragilité et de risques de fissuration précoce, des formulations adéquatement ajustées peuvent significativement améliorer la durabilité des chaussées. Ces découvertes apportent une contribution importante à la littérature existante et ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation optimisée des GBR dans l'industrie routière. Elles suggèrent que des adaptations spécifiques aux conditions climatiques canadiennes sont nécessaires pour maximiser les avantages de l'utilisation des GBR tout en minimisant les risques associés.

En conclusion, cette thèse offre des perspectives innovantes sur la formulation et la caractérisation des enrobés à fort taux de GBR, proposant des recommandations pour leur application pratique dans le contexte canadien. Elle propose également des stratégies pour surmonter les limitations actuelles grâce à une meilleure compréhension des interactions entre les matériaux recyclés et neufs, offrant ainsi des opportunités d'amélioration significative de la durabilité et de la performance des chaussées à l'échelle nationale.

Mots-clés : enrobé bitumineux, granulats bitumineux recyclés, module complexe, viscoélasticité linéaire, fissurations

Laboratory evaluation of the influence of using high levels of reclaimed bituminous aggregates in hot-mix asphalt mixes

Marc-André BÉRUBÉ

ABSTRACT

Canada's heavy reliance on its road network for the transportation of goods and people underscores the crucial importance of maintaining these infrastructures in the best possible condition. This thesis explores the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in the construction and rehabilitation of pavements, a promising approach to optimizing both costs and the environmental footprint of these essential infrastructures. Despite their significant potential benefits in terms of cost reduction and environmental footprint, the incorporation of RAPs into asphalt mixes at high rates is limited by a lack of confirmatory data on their long-term behavior, especially under the constraints of Canada's northern climate.

This doctoral research aims to fill this gap by developing asphalt mixes containing a high percentage of RAP and thoroughly evaluating their performance in the laboratory. The experimental program is structured around three main areas: first, a detailed study of RAP characterization to understand its composition and physical properties; second, an analysis of the impact of mixer type and mixing time on the volumetric properties and performance of the asphalt mixes; and third, an evaluation of the performance of asphalt mixes containing different percentages of RAP, specifically focusing on the mobilization of recycled bitumen and its interaction with new bitumen. The experimental results, presented in this thesis in the form of scientific articles, have shown that while incorporating RAP at high rates presents challenges, such as increased brittleness and early cracking risks, properly adjusted formulations can significantly improve pavement durability. These findings make an important contribution to the existing literature and open new avenues for the optimized use of RAP in the road industry. They suggest that specific adaptations to Canadian climatic conditions are necessary to maximize the benefits of using RAP while minimizing the associated risks.

In conclusion, this thesis offers innovative insights into the formulation and characterization of asphalt mixes with high RAP content, providing recommendations for their practical application in the Canadian context. It also proposes strategies to overcome current limitations through a better understanding of the interactions between recycled and new materials, thus offering opportunities for significant improvements in the durability and performance of pavements nationwide.

Keywords: asphalt mix, recycled asphalt aggregate, complex modulus, linear viscoelasticity, cracking

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Rôle d'un enrobé bitumineux dans une chaussée bitumineuse.....	5
1.2 Description des constituants d'un enrobé bitumineux	6
1.2.1 Granulats	6
1.2.1.1 Caractérisation des granulats	7
1.2.1.2 Classification des granulats.....	8
1.2.2 Bitume.....	9
1.2.2.1 Vieillessement du bitume	12
1.2.2.2 Comportement du bitume	15
1.2.2.3 Caractérisation des bitumes	16
1.2.2.4 Classification des bitumes.....	31
1.2.3 Granulats bitumineux récupérés	33
1.2.3.1 Historique.....	33
1.2.3.2 Caractérisation des granulats bitumineux récupérés.....	35
1.3 Composition de l'enrobé bitumineux.....	39
1.3.1 Propriétés volumétriques	39
1.3.1.1 Degré d'activation du bitume des GBR	43
1.4 Fabrication des enrobés en laboratoire	44
1.5 Propriétés et performances des enrobés bitumineux.....	46
1.5.1 Compactabilité	47
1.5.2 Orniérage.....	48
1.5.3 Comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux	50
1.5.3.1 Représentation graphique des résultats	53
1.5.3.2 Principe d'équivalence temps-température (PETT).....	55
1.5.3.3 Modélisation du comportement viscoélastique des matériaux.....	57
1.5.4 Rigidité par traction indirecte	59
1.5.5 Fissuration.....	61
1.5.6 Fatigue.....	65
1.6 Méthode de formulation des enrobés bitumineux avec granulats bitumineux recyclés	67
1.7 Sommaire de la revue de littérature	70
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE.....	73
2.1 Objectifs de la recherche.....	73
2.2 Matériaux à l'étude	75
2.3 Méthodologie expérimentale	76
2.3.1 Volet 1 : Caractérisation des granulats bitumineux récupérés.....	76
2.3.2 Volet 2 : Impact du malaxage des enrobés en laboratoire	87

2.3.3	Volet 3 : Évaluation de l'activation du bitume des granulats bitumineux recyclés	92
2.4	Organisation du document	95
CHAPITRE 3 PHYSICAL, RHEOLOGICAL, AND INFRARED ABSORBANCE PROPERTIES OF SEVERAL SOURCES OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT FROM THE SAME AREA IN MONTREAL REGION		
3.1	Abstract	99
3.2	Introduction	100
3.3	Experimental methodology and materials	103
3.3.1	Characterization of RAP materials and RAP aggregates	104
3.3.2	Characterization of RAP bitumens	105
3.4	Results and discussions	108
3.4.1	Basic and physical properties of RAP materials and RAP aggregates	108
3.4.2	Characterization of RAP Bitumen from trichloroethylene extraction	111
3.4.2.1	Basic properties	111
3.4.2.2	Performance grading (PG) properties	113
3.4.2.3	Linear viscoelastic (LVE) properties	115
3.4.2.4	FTIR absorbance results	118
3.5	Conclusions	124
3.6	Future developments	125
CHAPITRE 4 LABORATORY STUDY OF THE EFFECTS OF THE MIXER TYPE AND MIXING TIME ON THE VOLUMETRIC PROPERTIES AND PERFORMANCE OF A HMA WITH 30 PERCENT RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT		
4.1	Abstract	127
4.2	Introduction	128
4.3	Experimental Program	130
4.3.1	Materials	132
4.3.2	Preparations of Raw Materials, Mix Design, and HMA Selection	133
4.3.3	Mixer types and mixing times	134
4.3.4	Conditioning of Materials and Mixing Conditions	136
4.3.5	Batch Size, Splitting, and Conservation before testing	137
4.3.6	Determining HMA Volumetric Properties and Compactability	137
4.3.7	Specimen Preparation and Determining HMA Performance (stiffness and crack resistance)	138
4.4	Results and Analysis	140
4.4.1	HMA Volumetric Properties and Compactability	140
4.4.1.1	Air Voids Evaluation	142
4.4.1.2	Bitumen Content and Gradation	145
4.4.2	HMA Performance	147

4.4.2.1	Indirect Tensile Strength Modulus (ITSM)	147
4.4.2.2	Effect of Air Voids on ITSM Results	151
4.4.2.3	Indirect Tensile Strength (IDT)	152
4.4.2.4	Crack Tolerance Index (CT _{index})	155
4.4.2.5	Work of Failure (W _f) and Failure Energy (G _f)	157
4.5	Conclusion	161
CHAPITRE 5	EXPLORING THE EFFECTS OF RAP BITUMEN MOBILIZATION ON HOT-MIX ASPHALT PERFORMANCE AND THE USE OF BITUMEN BLENDING CHARTS TO PREDICT THEM: A LABORATORY INVESTIGATION	165
5.1	Abstract	165
5.2	Introduction	166
5.3	Experimental study	168
5.3.1	Materials	168
5.3.2	Mix design	170
5.3.3	Methodology	172
5.4	Test results and discussions	176
5.4.1	Volumetric properties: G _{mm} test.....	176
5.4.2	Compactability: SGC test	180
5.4.3	Permanent deformation: rutting test.....	181
5.4.4	Linear viscoelastic (LVE) properties: E* test	182
5.4.5	Thermal cracking resistance (TSRST test)	190
5.5	Conclusion	192
CONCLUSION		195
RECOMMANDATIONS		201
ANNEXE I	IMPACT OF MIXER TYPE AND MIXING TIME FOR HOT MIX ASPHALT WITH HIGH RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT CONTENT ON MIX PERFORMANCE	203
ANNEXE II	RHEOLOGICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF MULTIPLE RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT SOURCES FROM QUEBEC, CANADA	239
ANNEXE III	LABORATORY STUDY: ASSESSING BITUMEN BLENDING CHARTS FOR ASPHALT MIXES WITH RECYCLED ASPHALT PAVEMENT	251
ANNEXE IV	FICHES DESCRIPTIVES DES BITUMES D'APPORTS	263
ANNEXE V	FICHES DESCRIPTIVES DES GRANULATS	265
ANNEXE VI	FEUILLES DE FORMULES D'ENROBÉ DES VOLETS 2 ET 3	271

ANNEXE VII	RÉSULTATS BRUTS DES ESSAIS RÉALISÉS	291
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		453

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Essais de caractérisation pour les granulats des enrobés bitumineux 8
Tableau 1.2	Catégories de gros granulats selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et aux chocs 9
Tableau 1.3	Catégorie de gros granulats selon leurs caractéristiques de fabrication 9
Tableau 1.4	Catégorie de granulats fins selon leurs caractéristiques de fabrication 9
Tableau 1.5	Additifs utilisés pour modifier le bitume 11
Tableau 1.6	Avantages des différents types de modificateurs.....12
Tableau 1.7	Caractérisation des bitumes selon les essais rhéologiques 17
Tableau 1.8	Exigences MSCR pour les bitumes Te n-Tb au Québec.....23
Tableau 1.9	Choix des bitumes.....33
Tableau 1.10	Sélection du grade de bitume en fonction de la teneur et les caractéristiques du GBR 68
Tableau 2.1	Bitumes à l'étude 75
Tableau 2.2	Granulats à l'étude.....76
Tableau 2.3	Liste des essais du volet 1 78
Tableau 2.4	Liste des essais du volet 2 89
Tableau 2.5	Liste des essais du volet 3 93
Tableau 3.1	G* testing conditions, plates diameter and specimen thickness 106
Tableau 3.2	Principal FTIR indices used to evaluate bitumen ageing.....108
Tableau 3.3	RAP materials and RAP aggregates properties 108
Tableau 3.4	RAP bitumen properties.....112
Tableau 3.5	2S2P1D parameters and WLF constants.....117
Tableau 3.6	Area value (%·cm ⁻¹) of FTIR absorbance peaks.....120

Tableau 4.1	Virgin aggregate properties.....	132
Tableau 4.2	Reclaimed asphalt pavement (RAP) and virgin bitumen properties.....	133
Tableau 4.3	Reclaimed asphalt pavement (RAP) properties	133
Tableau 4.4	Conditioning of materials before mixing, mixer type, and mixing time	136
Tableau 4.5	Volumetric properties	141
Tableau 4.6	Air voids (V_a) obtained from the SGC test.....	143
Tableau 4.7	Bitumen content and particle size distribution from ignition	146
Tableau 4.8	ITSM results at -20 , -10 , 0 , and 10 °C	148
Tableau 4.9	One-way ANOVA of ITSM results at -20 , -10 , 0 , and 10 °C (significance level = 0.05).....	150
Tableau 4.10	One-way ANOVA of IDT results at -20 and 25 °C (significance level = 0.05).....	154
Tableau 4.11	One-way ANOVA of CT_{index} results at -20 and 25 °C (significance level = 0.05).....	157
Tableau 4.12	One-way ANOVA of W_f and G_f results at -20 and 25 °C (significance level = 0.05).....	160
Tableau 5.1	Virgin aggregates properties.....	169
Tableau 5.2	Virgin and RAP bitumen properties	170
Tableau 5.3	Volumetric's properties of the studies mixes ($n=2$).....	178
Tableau 5.4	SGC results at 10, 60, 80, 100 and 200 gyrations ($n=1$).....	180
Tableau 5.5	2S2P1D model parameters and WLF law constants.....	186

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Structure d'une chaussée d'enrobé bitumineuse 5
Figure 1.2	Représentation schématique de l'appareil RTFO 14
Figure 1.3	Représentation schématique de l'appareil PAV 15
Figure 1.4	Comportement type des liants bitumineux, (ϵ) déformation et (T) température du liant 16
Figure 1.5	Représentation schématique de l'essai du rhéomètre à cisaillement dynamique.....18
Figure 1.6	Relation entre la viscosité et l'élasticité dans le comportement du bitume 20
Figure 1.7	Exemples de résultats MSCR) 22
Figure 1.8	Essai de rhéomètre à poutre de flexion (BBR) 24
Figure 1.9	Principe de l'essai de pénétration à l'aiguille 27
Figure 1.10	Principe de l'essai bille et anneau 28
Figure 1.11	Principe de l'essai de recouvrance élastique 29
Figure 1.12	Principe de l'essai FTIR 30
Figure 1.13	Exemple de résultats FTIR.....31
Figure 1.14	Fabrication des GBR.....34
Figure 1.15	Montage expérimentale d'une évaporation rotative 37
Figure 1.16	Diagramme de phase d'un enrobé bitumineux 40
Figure 1.17	Représentation des vides dans les granulats d'un enrobé.....41
Figure 1.18	Composition schématique d'un GBR.....44
Figure 1.19	Distribution des bitumes lors du malaxage 46
Figure 1.20	Comportement type des enrobés bitumineux, (ϵ) déformation et (N) nombre de cycles de chargements 47

Figure 1.21	Illustrations du procédé de la PCG : physique (a) et mécanique (b)	48
Figure 1.22	Essais d'évaluation d'orniérage : a) Essai Hamburg; b) Essai <i>Asphalt Pavement Analyser</i> et c) Essai français	49
Figure 1.23	Sollicitation en traction et compression des enrobés lors du passage des véhicules.....	51
Figure 1.24	Variation de la contrainte et de la déformation lors d'un essai de module complexe à 1 Hz et 15,1°C Enrobé à 15% de GBR.....	52
Figure 1.25	Exemple de courbe isotherme Enrobé MUN-10 avec 15 % de GBR	53
Figure 1.26	Exemple de courbe isochrone Enrobé MUN-10 avec 15 % de GBR	54
Figure 1.27	Exemple d'espace de Black Enrobé MUN-10 avec 15% de GBR	54
Figure 1.28	Exemple de plan Cole-Cole Enrobé avec 15% de GBR	55
Figure 1.29	Courbes maîtresse : a) Norme du module complexe $ E^* $ et b) Angle de phase. Enrobé MUN-10 à 15 % de GBR	57
Figure 1.30	Élément de Maxwell (a) et de Kelvin-Voigt (b)	57
Figure 1.31	Représentation du modèle 2S2P1D	58
Figure 1.32	(a) Schéma de distribution des charges lors de l'essai de traction indirecte, (b) Installation des extensomètres sur l'éprouvette, (c) Essai de traction indirecte.....	60
Figure 1.33	Essais en flexion sur trois points et charge constante	62
Figure 1.34	Évolution des contraintes lors de l'essai TSRST	63
Figure 1.35	Essais pour déterminer la propagation de fissures : a) essai de poutre entaillée à bord unique (SEB), (b) essai de traction compacte en forme de disque (DCT), et (c) essai de flexion semi-circulaire (SCB).	64
Figure 1.36	Types d'essais de fatigue sur les enrobés bitumineux.....	66
Figure 1.37	Résultats typiques de la variation de module complexe pendant un essai de fatigue (Gauche) - Ratio de changement d'énergie dissipé RDEC en fonction du nombre de cycles appliqués (Droite).....	67
Figure 1.38	Exemple de résultats de charte de mélange de bitume d'apport et de bitume extrait du GBR.....	69

Figure 2.1	Organigramme du programme de recherche.....	74
Figure 2.2	Essais de densité maximale.....	79
Figure 2.3	Appareils de tamisage : a) Tamisage des gros granulats (Gilson); et b) Tamisage granulats fins (Ro-Tap)	80
Figure 2.4	Four à ignition.....	80
Figure 2.5	Distillation du trichloréthylène (TCE) au ROTOVAP	81
Figure 2.6	Pénétrromètre	82
Figure 2.7	Appareil Brookfield	83
Figure 2.8	Appareil rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR).....	84
Figure 2.9	Rhéomètre à flexion de poutre (BBR)	85
Figure 2.10	Diamètre des éprouvettes au DSR	86
Figure 2.11	Appareil de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier	87
Figure 2.12	Type de malaxeurs de l'étude: a) Malaxeur de comptoir Hobart; b) Malaxer à hélice Pugmill; et c) Malaxeur thermoréguler	88
Figure 2.13	Méthode de compaction : a) Compaction Marshall; et b) Presse à cisaillement giratoire (PCG)	90
Figure 2.14	Détermination de la densité brute de l'enrobé.....	91
Figure 2.15	Essais d'évaluation de la rigidité : a) Module de rigidité en traction indirecte (ITSM); et b) Traction indirecte (IDT)	92
Figure 2.16	Compacteur LCPC	94
Figure 2.17	Équipements pour la préparation des éprouvettes : a) Scie à l'eau; b) Carotteuse et c) Surfaceuse.....	95
Figure 3.1	Schematic diagram of the experimental methodology.....	104
Figure 3.2	Particles size distribution: (a) Before ignition (RAP material: black curve) and, (b) After ignition (RAP aggregates, white curve)	110
Figure 3.3	Impact of bitumen on particles size distribution.....	111

Figure 3.4	MSCR test result: relationships between the elastic recovery ($R_{3.2}$) and the non-recoverable creep compliance ($J_{nr3.2}$) at the stress level of 3.2 kPa.....	114
Figure 3.5	Complex shear modulus (G^*) test results (-30 to 82 °C; 0.1 to 10 Hz): (a) Black space with $ G^* $ according to the ϕ , (b) Cole-Cole plan representing components of $ G^* $ and, (c) Master curve of $ G^* $ according to $a_T \cdot f_r$ for $T_{ref} = 15$ °C.....	116
Figure 3.6	Characterization of cracking potential by the Glover-Rowe parameter within the Black-Space plot for nine bitumens.....	118
Figure 3.7	FTIR results: (a) Absorbance according to wave number from 4,000 to 400 cm^{-1} and, (b) Absorbance according to wave number from 1,800 to 1,000 cm^{-1}	119
Figure 3.8	Indices determined from FTIR results: (a) Sulphoxide and symmetrical stretch, (b) Aromaticity and carbonyl, (c) Long chain and, (d) Aliphaticity and asymmetrical stretch ($n=3$)	122
Figure 3.9	Bitumen properties (T_{mixing} , T_{high} and ΔT) in function of Long chain Index, LCI ($(\text{CH}_2)_n$)	123
Figure 4.1	Organigram of the experimental program.....	131
Figure 4.2	Particle size distribution of studied mix.....	134
Figure 4.3	Mixers used for the study: (a) countertop mixer (HB); (b) pugmill mixer (PM); (c) thermoregulated mixer (TR).....	135
Figure 4.4	Determining HMA volumetric properties and compactability: (a) maximum specific gravity (Gmm) test; (b) shear gyratory compactor (SGC) device.....	138
Figure 4.5	Marshall method: (a) compaction of the specimens; (b) hydrostatic weighing	139
Figure 4.6	Asphalt performance evaluation: (a) ITSM device; (b) IDT device.....	140
Figure 4.7	Effective volume of asphalt binder (V_{be}) and voids filled with asphalt (VFA) in the function of the air voids (V_a) at N_{design}	144
Figure 4.8	Voids with Marshall compaction (M) after 40 blows each side ($n = 6$) and shear gyratory compaction (SGC) at N_{design} ($n = 1$)......	144

Figure 4.9	Shear gyratory compactor SGC voids ($n = 1$) and Marshall voids after 40 blows ($n = 6$) in the function of 80 μ m sieve-passing after mixing and an ignition test.....	147
Figure 4.10	ITSM results at -20 , -10 , 0 , and 10 °C in the function of the air voids ($n = 3$ for each mixing condition and thus, $n = 36$ for each temperature)	152
Figure 4.11	Indirect tensile strength (IDT) results at 25 °C ($n = 3$).....	153
Figure 4.12	Indirect tensile strength (IDT) results at -20 °C ($n = 3$).....	153
Figure 4.13	Crack tolerance index (CT_{index}) results at 25 °C ($n = 3$)	155
Figure 4.14	Crack tolerance index (CT_{index}) results at -20 °C ($n = 3$).	156
Figure 4.15	IDT results example: force recorded as a function of displacement for HB-1 specimens at 25 °C and -20 °C.....	158
Figure 4.16	Work of failure (W_f) results at 25 °C ($n = 3$) and -20 °C ($n = 3$).....	158
Figure 4.17	Failure energy (G_f) results at 25 °C ($n = 3$) and -20 °C ($n = 3$)	159
Figure 5.1	Mixes gradation, maximum density line (MDL) and MUN-10 specifications.....	171
Figure 5.2	Research organigram	174
Figure 5.3	Compacted slab cutting section: a) Plan view cut; b) A-A section: TSRST samples coring and; c) B-B section: E* samples coring (dimensions in mm).....	175
Figure 5.4	Maximum specific gravity (G_{mm}) results ($n=2$)	177
Figure 5.5	SGC results at 80 gyrations (N_{design}) in function of RBR ($n=1$)	181
Figure 5.6	Rutting results tested at 52°C ($n = 2$) in function of RBR.....	182
Figure 5.7	Complex modulus results FM mixes ($T_{ref} = 10$ °C): a) Black space; b) Cole-Cole plan; and c) Master curve of the stiffness $ E^* $ and phase angle δ	185
Figure 5.8	Complex modulus results 60M mixes ($T_{ref} = 10$ °C): a) Black space; b) Cole-Cole plan; and c) Master curve of the stiffness $ E^* $ and phase angle δ	186
Figure 5.9	Stiffness ratio of mixes based on 0% RAP mix ($T_{ref} = 10$ °C).....	187

Figure 5.10	Phase angle change ($\Delta\delta$) of mixes based on 0% RAP mix ($T_{ref} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) 188
Figure 5.11	Stiffness ratio and phase angle change ($\Delta\delta$) of mixes based on 0% RAP mix ($10\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ Hz}$).....189
Figure 5.12	TSRST results: a) Fractured stress and; b) Fracture temperature ($n = 3$) 191
Figure 5.13	TSRST results of FM mixes 192

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

$ E^* $	Norme du module complexe
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
APP	Polypropylène atactique
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
b	Épaisseur de l'éprouvette
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i> , rigidité au fluage en flexion
BNQ	Bureau des normes du Québec
C1	Constante 1 pour WLF
C2	Constant 2 pour WLF
CPP	Coefficient par polissage
CSA	<i>Canadian Standard Association</i> , association des normes du Canada
CT	Court terme
CTindex	<i>Crack Tolerance Index</i> , indice de tolérance à la fissuration
d/D	Dimension granulaire (petit/grand diamètre)
d_b	Densité du bitume
$d_{b, GBR}$	Densité du bitume oxydé du GBR
DCT	Traction compacte en forme de disque
DdF	Degré de fusion
d_{gb}	Densité du granulat brute
d_{ge}	Densité des granulats effectives
DJMA	Débit journalier moyen annuel
d_{mb}	Densité brute de l'enrobé
d_{mm}	Densité maximale de l'enrobé
$d_{mm, GBR}$	Densité maximale du GBR
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i> , rhéomètre à cisaillement dynamique
E	Module de rigidité
E^*	Module complexe
E_1	Composante élastique
E_2	Composante visqueuse

EBA	Acrylate d'éthylène et de butyle
EMA	Acrylate d'éthylène et de méthyle
EPDM	Terpolymère éthylène-propylène-diène
EVA	Éthylène-acétate de vinyle
F	Charge appliquée
F_{cb}	Facteur de correction de la teneur en bitume du four en ignition
FM	Filler minéral
$G''(\omega)$	Module dynamique imaginaire à la fréquence ω
$G'(\omega)$	Module dynamique réelle à la fréquence ω
G^*	Module de résistance au cisaillement
$G^*(\omega)$	Module complexe à la fréquence ω
GBR	Granulats bitumineux récupérés
GF	Granulats fins
GG	Gros granulats
h	Épaisseur de l'éprouvette
i	Nombre complexe
IDT	<i>Indirect Tensile Test</i> , essai de traction indirecte
IIR	Copolymère isobutène-isoprène
$ITSM_{GBR}$	Module de rigidité de traction indirecte de l'enrobé avec GBR
$ITSM_{REF}$	Module de rigidité de traction indirecte de l'enrobé avec GBR
$J_{nr\ 3.2}$	Complaisance non-recouvrable
$J_{nr\ diff}$	Complaisance non-recouvrable différentielle
L	Longueur de la portée
LA	<i>Los-Angeles</i>
LC	Laboratoire des chaussés
LCMB	Laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
LT	Long terme
$m(60)_1$	Pente de la courbe à 60s pour la température d'essai 1
$m(60)_2$	Pente de la courbe à 60s pour la température d'essai 2

M_b	Masse totale de bitume
m_{be}	Masse de bitume effective
MD	Micro-Deval
ME	<i>Mécaniste-empiriques</i>
M_{gb}	Masse totale des granulats
M_m	Masse totale de l'enrobé
MSCR	<i>Multiple stress creep recovery</i>
MTMD	Ministère des transports et mobilités durables
MTQ	Ministère des Transports du Québec
<i>m-value</i>	tangente de la courbe de fluage au temps de charge de 60 s
n	niveau de sollicitation
P	Charge d'essai mesurée
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
P_b	Masse totale de bitume
P_{ba}	Pourcentage de bitume absorbé
PBD	Polybutadiène
P_{bi}	Masse de bitume initiale exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé
$P_{bi, ap.}$	Masse de bitume du bitume d'apport exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé
$P_{bi, GBR}$	Masse de bitume du GBR exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PE	Polyéthylène
$pen_{ap.}$	Pénétration à l'aiguille du bitume d'apport
$pen_{visée}$	Pénétration à l'aiguille visée pour la formulation
PETT	Principe d'Équivalence Temps-Température
PG	<i>Performance grade</i> , grade de performance
P_g	Masse des granulats
P_{GBR}	Masse des granulats bitumineux récupérés
PHQ	Personnel hautement qualifié
P_{mm}	Masse de l'enrobé total

PP	Polypropylène
PS	Polystyrène
PVC	Chlorure de polyvinyle
r	Rayon de l'éprouvette
R _{3.2}	Recouvrance d'élasticité
RBR	Ratio de bitume recyclé
RDEC	Ratio de changement d'énergie dissipée
RTFO	<i>Rolling Thin Film Oven</i>
RV	<i>Rotational viscosity</i>
S(60) ₁	Rigidité au fluage en flexion à la température d'essai 1 à 60s
S(60) ₂	Rigidité au fluage en flexion à la température d'essai 2 à 60s
SARA	<i>Saturate, aromatic, resin and asphaltene</i> , Saturés, aromatiques, résines et asphaltène
SBR	Styrène-butadiène-caoutchouc
SBS	Styrène-butadiène-styrène
SCB	Essai de flexion semi-circulaire
SEB	Essai de poutre enraillée à bord unique
SEBS	Styrène-éthylène-butadiène-styrène
SIS	Styrène-isoprène-styrène
S _m (t)	Rigidité au fluage en flexion au temps t
T ₁	Température d'essai 1
T ₂	Température d'essai 2
T _b (pente)	Température basse de caractérisation selon la pente
T _b (rigidité)	Température basse de caractérisation selon la rigidité
TCE	Trichloréthylène
T _e	Température haute de caractérisation selon la rigidité
t _{lag}	Temps de retard
TSRST	<i>Thermal Stress Restrained Specimen Test</i> , essai de retrait thermique empêché
UV	Ultraviolets
V _{be}	Volume de bitume effectif

VCB	Vides comblé par le bitume
VEL	Viscoélastique linéaire
VG	<i>Viscosity grade</i> , grade de viscosité
V_i	Volume des vides interstitiels
VMA	Vides intergranulaires
z	Déformation maximale
$\gamma_{\max}$	Déformation maximale
δ	Angle de phase
$\delta(t)$	Déflexion mesurée au temps t
ΔT_c	Différence de T_b
ε	Déformation
ε_0	Amplitude de déformation
θ	Angle de déflexion (rotation)
θ_{rupture}	Température de rupture
σ_0	Amplitude de contrainte
σ_{rupture}	Contrainte de rupture
T	Torque maximal appliqué
$\tau_{\max}$	Contrainte maximale appliquée
ν	Coefficient de poisson
$\Phi(\omega)$	Angle de phase à la fréquence ω
ϕ_E	Angle de déphasage
ω	Pulsation

XXVIII

°	Degré
°C	Degré Celsius
%	Pourcent
CO _{2eq}	Équivalent dioxyde de carbone
dmm	Dixième de millimètre
g	Gramme
Hz	Hertz
kg	Kilogramme
km	Kilomètre
kPa	Kilopascal
m/m	Mètre par mètre
MPa	Mégapascal
mm	Millimètre
mPa*s	Millipascal seconde
ms	milliseconde
Nm	Newton mètre
µm	Micromètre
m	Mètre
rad	Radians
rad/s	Radians par seconde
t	Temps
T	Tonne

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

°	Degré
°C	Degré Celsius
%	Pourcent
dmm	Dixième de millimètre
g	Gramme
Hz	Hertz
km	Kilomètre
kPa	Kilopascal
m/m	Mètre par mètre
MPa	Mégapascal
mm	Millimètre
mPa*s	Millipascal seconde
ms	Milliseconde
Nm	Newton mètre
µm	Micromètre
m	Mètre
rad	Radians
rad/s	Radians par seconde
t	Temps
T	Tonne

INTRODUCTION

Une très grande proportion des transports de marchandise ou de personnes au Canada est effectuée via le réseau routier. Il est donc primordial de maintenir ce réseau dans les meilleures conditions possibles en optimisant les interventions, qu'elles soient financières ou techniques. Il est d'autant plus important de s'assurer que les travaux effectués sur les chaussées soient faits dans un esprit de développement durable. C'est dans cet ordre d'idées que l'utilisation de matériaux recyclés comme les granulats bitumineux récupérés (GBR) sont de plus en plus utilisés dans les enrobés. Cependant, il n'est actuellement pas possible de mettre une grande quantité d'enrobés recyclés au Canada dans les enrobés à cause d'un manque de connaissances sur le sujet, et à cause d'une crainte face au comportement à basse température des enrobés contenant des enrobés recyclés.

Le réseau routier du Canada est le 7^e en étendue au monde avec un peu plus de 1 000 000 km (PIARC, 2015). Environ 95 % des routes revêtues sont des chaussées bitumineuses. Selon le bulletin de rendement des infrastructures canadiennes (Canada Infrastructure, 2019), plus de 25 % des routes municipales sont dans un état considéré passable, mauvais ou très mauvais. Il n'existe pas de telles données pour les routes sous juridiction provinciale au Canada. En revanche, des statistiques sont disponibles pour certaines provinces. Par exemple, Transport Québec estime que seulement 21 % de ses routes ne sont pas en bon état (MTQ, 2016).

L'expérience sur route et les travaux de recherche en laboratoire ont démontré le bien-fondé de l'utilisation des GBR, mais il est également reconnu que l'ajout d'enrobé recyclé avec les méthodes actuelles de formulation peut causer des problèmes, surtout à basse température (Tapsoba 2012; Mogawer & al., 2012). Parmi ses avantages, l'utilisation de GBR permet des économies substantielles, et d'amoindrir l'empreinte environnementale des chaussées. Cependant, les méthodes actuelles de formulation et d'insertion de GBR couplé au climat canadien en tenant compte de ses hivers rigoureux limitent l'apport positif au niveau du développement durable que peut être l'ajout de GBR à fort taux dans les enrobés pour la construction ou la réhabilitation des chaussées.

L'utilisation d'enrobés recyclés dans les enrobés neufs est une pratique courante au Canada et ailleurs. Au Canada, la quantité de GBR varie d'une province à l'autre. Par exemple, au Québec, le ministère des Transports autorise un maximum de 20 % de GBR dans les couches de base, en Ontario, maximum 15 % de GBR est permis sur les routes provinciales, et 30 % sont permis en Colombie-Britannique (Carter & al., 2018). L'expérience sur route et les travaux de recherche en laboratoire ont démontré le bien-fondé de l'utilisation des GBR, mais il est également reconnu que l'ajout d'enrobé recyclé avec les méthodes actuelles de formulation peut causer des problèmes à basse température (Tapsoba 2012; Mogawer & al. 2012). L'utilisation de 20 % de GBR peut permettre des économies substantielles, atteignant jusqu'à 27 % (Visintine, 2011). Il permet d'amoinrir l'empreinte environnementale des chaussées jusqu'à 18 kg CO_{2eq} par Tonne d'enrobé (Zaumanis, 2014). Par contre, les méthodes actuelles de formulation et d'insertion de GBR couplé au climat canadien avec ces hivers rigoureux limitent l'apport positif au niveau du développement durable que peut être l'ajout de GBR à fort taux dans les enrobés pour la construction ou la réhabilitation des chaussées.

Les GBR sont générés lors du décohesionnement d'un enrobé endommagé sur chaussée. Les GBR sont donc composés, comme les enrobés, de granulats de différentes dimensions et de bitume. L'utilisation de GBR dans les enrobés permet de minimiser l'utilisation de ressources naturelles non renouvelable, la consommation d'énergie, les coûts et l'impact environnemental du transport (Navaro, 2011). Il est accepté par l'industrie que l'utilisation de moins de 10 % par masse de GBR dans les enrobés à un impact très limité au niveau des propriétés mécaniques (Moneron et Measson, 2004; Li & al., 2008). Par contre, lorsqu'entre 10 et 20 % de GBR sont ajoutés dans les enrobés, l'influence du bitume vieilli des GBR augmente et peut amener l'enrobé à devenir plus fragile. À des taux de GBR plus élevés, il est conseillé de bien caractériser les GBR et d'ajuster le bitume d'apport selon la rigidité du bitume des GBR (McDaniel & al., 2000). Actuellement, la formulation d'enrobé contenant des GBR est effectuée en suivant le rapport de la *Federal Highway Administration's RAP Expert Task Force* qui mentionne que 100 % du bitume des GBR peut être considéré comme utilisable, comme mobilisable dans le nouvel enrobé (Bukowski, 1997). Le fait que 100 % du bitume des GBR est mobilisable est actuellement remis en question (Bressi & al., 2015). Le choix des GBR a

une influence sur le comportement des enrobés. Ce n'est pas seulement la quantité de GBR qui influence les propriétés finales, mais la granulométrie et les caractéristiques du bitume ont un impact important. Par exemple, Salianni & al. (2016) ont montré que la quantité de bitume mobilisable dans les GBR dépend de la granulométrie de ces derniers. Les particules plus fines des GBR contiennent une concentration en bitume plus élevée et plus oxydé. Un bitume oxydé est plus rigide, mais également fragile, et un bitume fragile est plus susceptible de se fissurer sous l'action du trafic et du changement de la température (Tauste & al., 2018).

L'augmentation de la rigidité des enrobés contenant des GBR est positive du point de vue de la résistance à l'orniérage et au niveau du développement des déformations permanentes dans les chaussées. Par contre, l'ajout de GBR peut avoir un impact négatif au niveau de la sensibilité à l'humidité à cause de l'interaction entre le bitume d'apport et le bitume recyclé, mais aussi au niveau de la fatigue à cause de la fragilité du bitume (Baaj & al., 2013; Krishna Swamy & al., 2011). Ceci étant dit, il n'y a pas de consensus au niveau de la résistance à la fatigue, car dans plusieurs cas les enrobés avec GBR ont une résistance à la fatigue égale ou inférieure aux enrobés sans GBR, mais parfois ils ont une résistance à la fatigue supérieure (Basuony & al., 2015). Il est donc primordial de bien comprendre l'impact de l'ajout de GBR au niveau du comportement thermomécanique et au niveau de la résistance aux dégradations, autant à l'échelle du matériau qu'à l'échelle de la structure de la chaussée, afin d'optimiser la formulation et la production d'enrobé avec GBR.

Au niveau du développement durable, l'utilisation de grande quantité de GBR est une solution importante qui permettrait de réduire l'empreinte environnementale des chaussées. Cette pratique permet de substituer une part des bitumes et granulats neufs dans la production des nouveaux enrobés. Afin de pouvoir pleinement tirer profit des bénéfices financiers et environnementaux de l'ajout de GBR au Canada, il est essentiel d'avoir une méthode de formulation et de caractérisation spécialement adaptées aux enrobés avec taux élevé de GBR (> 20 %) (Zaumanis, 2014; McDaniel & al., 2000).

Pour ce faire, l'objectif principal de cette thèse consiste à développer des enrobés à fort taux de GBR et à évaluer leur comportement. Pour atteindre ces objectifs, le programme expérimental est divisé en trois volets : 1) une étude de caractérisation des GBR, 2) une analyse de l'impact du malaxage des enrobés avec GBR en laboratoire, et 3) une évaluation de la performance des enrobés à différents taux de GBR. En raison de la nature de cette thèse sous forme d'articles, la structure du document est particulière. Plus précisément, les résultats expérimentaux ont été soumis et/ou publiés dans des revues scientifiques. Ces articles sont intégrés dans le corps du document.

Le CHAPITRE 1 présente une synthèse de la littérature, tandis que le CHAPITRE 2 décrit la méthodologie du travail ainsi que les matériaux utilisés et la structure du présent document. Puisqu'il s'agit d'une thèse par articles, les trois principaux articles en lien avec les travaux de cette thèse sont ensuite présentés. Dans le CHAPITRE 3, le premier article, intitulé "*Physical, rheological, and infrared absorbance properties of several sources of reclaimed asphalt pavement from the same area in Montreal region*", est présenté. Le CHAPITRE 4 aborde le deuxième article de la thèse, intitulé "*Laboratory study of the effects of the mixer type and mixing time on the volumetric properties and performance of a HMA with 30 percent reclaimed asphalt pavement*". Quant au CHAPITRE 5, il présente le troisième article de la thèse, intitulé "*Exploring the effects of RAP bitumen mobilization on hot-mix asphalt performance and the use of bitumen blending charts to predict them: a laboratory investigation*". Le CHAPITRE 6 récapitule les résultats publiés, établissant des liens entre les trois volets de la recherche. Finalement, le document présente également une conclusion et des recommandations.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Rôle d'un enrobé bitumineux dans une chaussée bitumineuse

La fonction principale de la chaussée bitumineuse est d'assurer le confort et la sécurité de circulation pour les usagers (Smeed, 1949; Goniewicz & al., 2016). Sa composition, telle que présentée à la Figure 1.1, est constituée de divers matériaux ayant chacun une fonction spécifique, permettant ainsi à la surface de résister aux contraintes causées par le passage des véhicules (Leclerc, 2010).

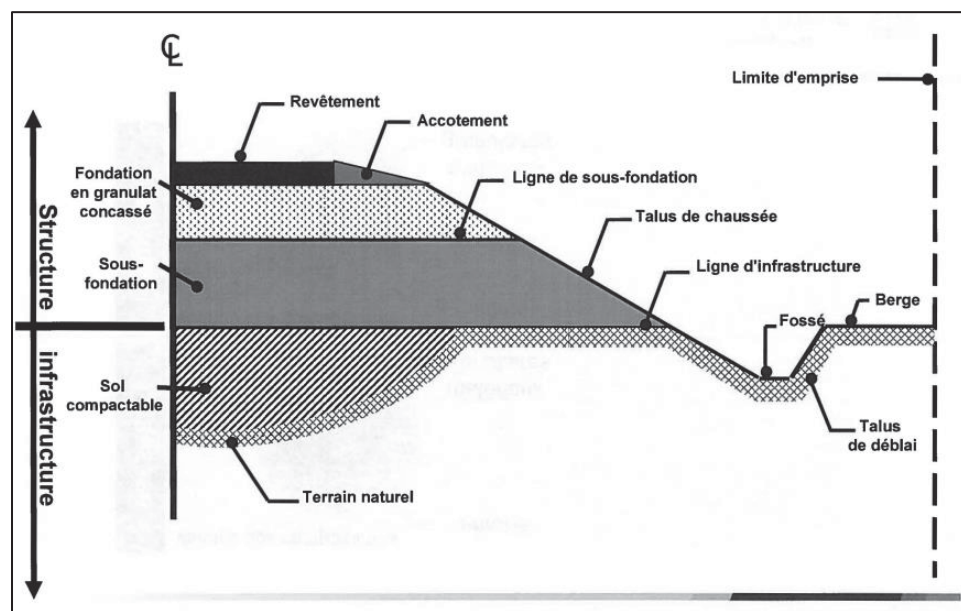


Figure 1.1 Structure d'une chaussée d'enrobé bitumineuse
Tirée de Leclerc (2010)

Le corps de la chaussée, qui comprend la fondation et la sous-fondation, est généralement constitué de matériaux granulaires afin de prévenir la pénétration du gel et de répartir les charges pour éviter toute déformation permanente (Wang, Zhang, & Tan, 2009). Le revêtement d'une chaussée bitumineuse se compose habituellement de deux couches d'enrobés bitumineux,

mais peut être composé d'une ou trois couches dépendamment du niveau de trafic. Le choix des matériaux et des différentes composantes doit prendre en compte plusieurs facteurs tels que la sécurité et le confort des usagers, la préservation de l'intégrité de la chaussée, l'impact environnemental en termes de bruit, le niveau de sollicitation et la possibilité de régénération des caractéristiques de surface (Leclerc, 2010).

1.2 Description des constituants d'un enrobé bitumineux

Les enrobés bitumineux sont constitués d'un mélange de granulats et de bitume (Skidmore, 1936; Di Benedetto & Corté, 2005). La masse granulaire est généralement composée de roche concassée, mais aussi de matériaux recyclés comme du béton concassé ou des GBR, tandis que le bitume agit comme liant pour créer un mélange cohésif. En général, l'enrobé bitumineux contient seulement environ 5 % par rapport à sa masse totale de bitume.

1.2.1 Granulats

Les granulats, issus de roches consolidées, non consolidées ou de matériaux recyclés, sont des particules solides non cohésives essentielles dans la composition des enrobés bitumineux. Leur taille varie, avec une taille maximale de 20 mm pour les couches de base, 14 mm pour les intermédiaires et 10 mm pour les surfaces au Québec (Perraton, 2013). Classés par leur dimension granulaire (format d/D), on distingue au Québec trois catégories : les gros granulats (plus de 5 mm, subdivisés en 5-10, 10-14, 14-20 mm), les granulats fins (moins de 5 mm) et le filler minéral (moins de 630 μm) (BNQ, 2014). La granulométrie, déterminée par tamisage, permet de choisir les granulats adaptés aux caractéristiques voulues pour les couches bitumineuses, assurant ainsi durabilité et résistance. Pour les enrobés, huit propriétés des granulats sont cruciales : dimensions, densité, ténacité, solidité, forme, texture de surface, absorption et affinité avec le bitume (Lamothe, 2014).

1.2.1.1 Caractérisation des granulats

La qualité des granulats au Québec est jugée selon leurs caractéristiques intrinsèques, de fabrication, et complémentaires, définies par des normes spécifiques (BNQ, 2002; MTQ, 2007a). La sélection des granulats varie en fonction du type de route (autoroute, nationale, collectrice ou régionale), du niveau de trafic (nombre et type de véhicules) et des conditions climatiques (position géographique, pluie, cycles de gel-dégel), avec des exigences plus élevées pour les granulats de surface exposés aux éléments. Le Tableau 1.1 présente les principales caractéristiques évaluées au Québec sur les granulats pour la confection des enrobés bitumineux (Lamothe, 2014).

La roche mère détermine les propriétés intrinsèques des granulats telles que la résistance à l'abrasion et aux conditions environnementales, qui sont inaltérables. Les granulats riches en quartz et feldspath, tels que le granite, certaines roches volcaniques et le grès, sont plus durables, tandis que la résistance des calcaires peut varier (Perraton, 2013; Zhang & al., 2020). Les roches à grain fin offrent une meilleure résistance aux chocs et à la désagrégation par rapport à celles à grain grossier. Lors de la mise en œuvre des enrobés bitumineux, le frottement entre les particules peut entraîner leur usure.

Tableau 1.1 Essais de caractérisation pour les granulats des enrobés bitumineux
Adapté de Lamothe (2014)

Caractéristiques		Équipement principal	Exigence	Granulat ^A		
				GG	GF	FM
Intrinsèques	Résistance usure et attrition	Mirco-Deval	LC 21-070* LC 21-101*	X	X	
	Résist. fragmentation, abrasion, chocs Résistance à la friabilité	Los Angeles Micro-Deval	LC 21-400* LC 21-080*	X	X	
Fabrication	Fragmentation	---	LC 21-100*	X		
	Particules plates	Gabarits, vernier	LC 21-265*	X		
	Particules allongées			X		
Complémentaire	Propreté (particules <80µm)	Tamis	CSA-A23.2-5A**	X		
	Teneur en mottes d'argile	Tamis	CSA-A23.2-3A**		X	
	Teneur en particules <5µm	Hydromètre	BNQ, 1987		X	
	Coefficient d'écoulement	Cône	LC 21-075*		X	
	Coefficient de polissage par projection	Jet d'abrasifs	LC 21-102*	X		
Essentielles	Granulométrie***	Tamis	LC 21-040*	X	X	X
	Densités et absorption***	Panier à mailles ou pycnomètre	LC 21-065*		X	
			LC 21-066*		X	
			LC 21-067*	X		

^A GG : gros granulats (> 5mm) ; GF : granulats fins (< 5mm) ; FM : filler minéral (< 630 µm).
 * Exigences regroupées dans MTQ (2023b).
 ** Exigences regroupées dans CSA (2004).
 *** Essentielles pour la formulation de l'enrobé bitumineux (MTQ, 2013).

1.2.1.2 Classification des granulats

Au Québec, les granulats utilisés dans les matériaux routiers sont classifiés conformément à la norme 2101 (MTMD, 2023). Les gros granulats sont répartis en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques et de leurs propriétés de fabrication, comme illustrés dans le Tableau 1.2 et le Tableau 1.3 respectivement. Quant aux granulats fins, ils sont classés selon leurs propriétés intrinsèques, comme indiqué dans le Tableau 1.4.

Tableau 1.2 Catégories de gros granulats selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et aux chocs

Caractéristiques intrinsèques	Méthodes d'essais	Catégories de gros granulats					
		1	2	3	4	5	6
Micro-Deval (MD)	LC 21-070	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 30	≤ 40
Los Angeles (LA)	LC 21-400	≤ 35	≤ 45	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 50
Micro-Deval et Los Angeles (MD + LA)	---	≤ 40	≤ 55	≤ 70	≤ 75	≤ 80	≤ 85

Tableau 1.3 Catégorie de gros granulats selon leurs caractéristiques de fabrication

Caractéristiques de fabrication	Méthodes d'essais	Catégories de gros granulats				
		a	b	c	d	e
Fragmentation (%)	LC 21-070	100	≤ 75	≤ 60	≤ 60	≤ 50
Particules plates (%)	LC 21-400	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 30	---
Particules allongées	---	≤ 40	≤ 40	≤ 45	≤ 50	---

Tableau 1.4 Catégorie de granulats fins selon leurs caractéristiques de fabrication

Caractéristiques intrinsèques	Méthodes d'essais	Catégories de granulats fins		
		1	2	3
Micro-Deval (MD)	LC 21-101	≤ 30	≤ 35	≤ 35
Friabilité	LC 21-080	≤ 40	≤ 40	---

1.2.2 Bitume

Le bitume est un liant issu de la distillation fractionnée du pétrole brut (Traxler, 1936; Tayfur, Ozen & Aksoy, 2007; Guissi, 2016). Ce processus se compose d'une distillation atmosphérique dans laquelle les hydrocarbures légers sont séparés, suivi par une distillation sous vide pour obtenir le bitume à partir du résidu (Eurobitume, 2015). La qualité du bitume dépend de la

densité du pétrole brut, avec des pétroles plus denses donnant plus de bitume (Kim, 2005; Paliukaite, Vaitkus, & Zofka, 2014).

La composition chimique du bitume varie selon l'origine du pétrole et est analysée via la méthode SARA (*Saturate, aromatic, resin and asphaltene*), qui catégorise ses constituants en asphaltènes, résines, saturés et aromatiques. Les asphaltènes, de grande masse molaire et contenant divers éléments, sont dispersés dans les maltènes et influencent les propriétés physiques du bitume (Perraton & Olard, 2013; Lamothe, 2004; Hunter & al., 2015). On distingue deux types de structures moléculaires de bitume : le type Gel, riche en asphaltène, et le type Sol, riche en aromatiques, chacun présentant des comportements physiques distincts (Chailleux & Hammoum, 2014).

Des modifications peuvent être apportées au bitume pour améliorer ses propriétés mécaniques et sa résistance aux conditions climatiques, en utilisant des polymères naturels ou synthétiques (Zenke, 1976; Brown, Rowlett & Boucher, 1991; Wu & al., 2024). Ces modifications ajustent la rigidité et l'élasticité du bitume à différentes températures. Au Québec, par exemple, l'ajout de polymères permet d'augmenter ces caractéristiques, avec des dosages variant généralement de 1 à 3 %, pouvant atteindre 7 % pour certaines applications spéciales (Perraton, 2013; Hunter & al., 2015). Le Tableau 1.5 et le Tableau 1.6 listent divers additifs utilisés pour modifier le bitume, ainsi que les avantages de ces modificateurs.

Tableau 1.5 Additifs utilisés pour modifier le bitume
Tiré de Hunter & al. (2015)

Type de modification	Exemple de produit
Élastomères thermoplastiques	Styrène-butadiène-styrène (SBS) Styrène-butadiène-caoutchouc (SBR) Styrène-isoprène-styrène (SIS) Styrène-éthylène-butadiène-styrène (SEBS) Terpolymère éthylène-propylène-diène (EPDM) Copolymère isobutène-isoprène (IIR) Caoutchouc naturel Caoutchouc de pneu en miettes Polybutadiène (PBD) Polyisoprène
Polymères thermoplastiques	Éthylène-acétate de vinyle (EVA) Acrylate d'éthylène et de méthyle (EMA) Acrylate d'éthylène et de butyle (EBA) Polypropylène atactique (APP) Polyéthylène (PE) Polypropylène (PP) Chlorure de polyvinyle (PVC) Polystyrène (PS)
Polymères thermodurcissables	Résine époxy Résine polyuréthane Résine acrylique Résine phénolique
Modificateurs chimiques	Composés organo-métalliques Soufre Lignine
Améliorations de l'adhérence	Amines organiques Amides
Antioxydants	Amines Phénols Composés organo-zincifères/organo-plombifères
Fillers	Noir de carbone Chaux hydratée Chaux Cendres volantes

Tableau 1.6 Avantages des différents types de modificateurs
Tiré de Hunter & al. (2015)

Modificateur	Propriétés affectées				
	Déformation permanente	Fissuration thermique	Fissuration par fatigue	Résistance à l'eau	Vieillissement
Élastomères	X	X	X		X
Plastomères	X				
Caoutchouc de pneu		X	X		
Noir de carbone	X				
Soufre	X				X
Modificateurs chimiques	X				
Antioxydants					X
Améliorants de l'adhérence				X	X
Fillers				X	X

1.2.2.1 Vieillissement du bitume

Le bitume subit des altérations au fil de son utilisation, principalement en raison du processus de vieillissement (Hu & al., 2022; Tauste & al., 2018). Ce vieillissement, particulièrement crucial dans le contexte des chaussées, résulte de divers facteurs environnementaux. Au cours du temps, le bitume évolue sous l'influence de cinq (5) mécanismes majeurs :

- Oxydation : L'interaction avec l'oxygène de l'air déclenche une réaction chimique qui modifie la composition du bitume. Cette oxydation induit des transformations chimiques et physiques, contribuant à une augmentation de la rigidité du bitume au fil du temps.
- Évaporation des volatils : Les composants légers du bitume ont tendance à s'évaporer progressivement. Ce phénomène peut engendrer une perte de souplesse et une augmentation de la viscosité du bitume, accroissant ainsi la vulnérabilité de la chaussée aux fissures.
- Effets thermiques : Les variations de température et les cycles de gel/dégel accélèrent le processus de vieillissement du bitume, contribuant à sa dégradation progressive.

- Rayonnement UV : L'exposition aux rayons ultraviolets (UV) du soleil peut altérer les propriétés chimiques et physiques du bitume, accélérant ainsi son vieillissement.
- Action du trafic : Les charges répétées du trafic exercent des contraintes mécaniques sur la chaussée, ce qui peut accélérer le vieillissement du bitume.

Le processus de vieillissement du bitume a un impact significatif sur les performances globales de la chaussée, entraînant une perte d'élasticité, une augmentation de la fragilité et une diminution de la capacité du bitume à adhérer aux granulats (Gamarra & Ossa, 2018). Ces altérations progressives peuvent conduire à l'apparition de fissures, de déformations, et d'autres problèmes structurels au fil du temps. On y note deux états de vieillissement distincts, à savoir le vieillissement à court terme (CT) et à long terme (LT). Un vieillissement plus marqué est généralement observé lors de la production des enrobés, en raison des températures élevées et de l'importante exposition à l'oxygène (Jiang & al., 2021).

Pour simuler le vieillissement à CT des bitumes, qui représente le vieillissement lors du processus de production et de mise en œuvre durant lequel le liant est soumis à des températures et pressions élevées, l'appareil RTFO (*Rolling Thin Film Oven*) est utilisé (Hossain, & Wasiuddin, 2019), comme décrit schématiquement à la Figure 1.2. Le bitume est étalé en une fine pellicule à l'intérieur d'une bouteille en verre, simulant ainsi la mince couche de bitume présente à la surface d'une chaussée. Ensuite, il est exposé à des conditions de chaleur élevée, à environ 163 °C, en conjonction avec un flux d'air pendant une période prédéterminée, habituellement 85 minutes. À la suite de cette exposition, l'échantillon est récupéré et soumis à des essais visant à évaluer les effets de ce vieillissement sur ses propriétés. Le bitume vieilli à court terme peut également être soumis à une simulation de vieillissement à long terme (LT).

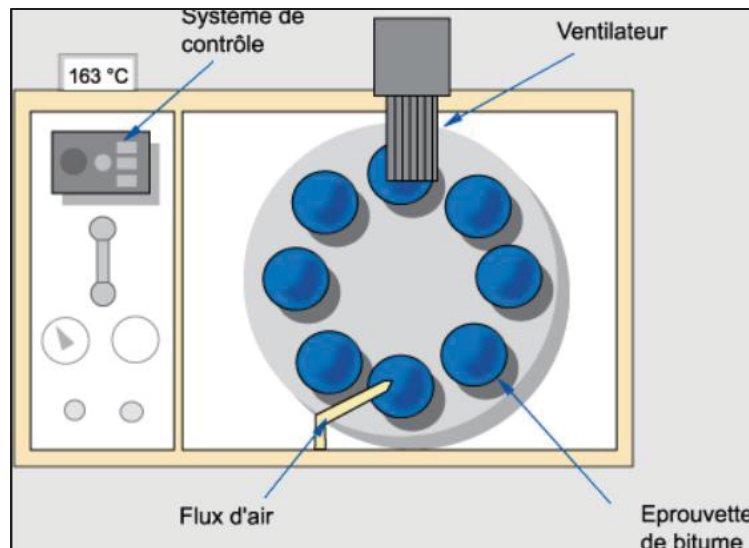


Figure 1.2 Représentation schématique de l'appareil RTFO
Tirée de ASTM (2022)

Le processus de vieillissement à LT, qui traduit les mécanismes qui se développent durant la période d'usage de l'enrobé, est effectué à l'aide de l'appareil PAV (*Pressure Aging Vessel*), permettant de simuler une période d'utilisation de 5 à 10 ans (Behera & al., 2013). Le bitume vieilli à CT est versé dans des assiettes en acier inoxydable, puis placé sur un support, tel qu'illustré dans la Figure 1.3. Ce support est ensuite positionné à l'intérieur d'une chambre hermétiquement scellée, et le bitume est exposé à une augmentation contrôlée de la température et de la pression pendant une période définie. La température appliquée dépend du grade de performance (PG) du bitume (ASTM, 2022; MTQ, 2023). Après cette période, la pression est relâchée et le bitume est récupéré. La dernière étape du processus de vieillissement à long terme consiste à éliminer les bulles d'air emprisonnées dans le bitume à l'aide d'une étuve sous vide, où le bitume est soumis à une température élevée et à une pression réduite. Le bitume est ensuite récupéré et conservé pour tester ses caractéristiques après vieillissement à CT et LT.

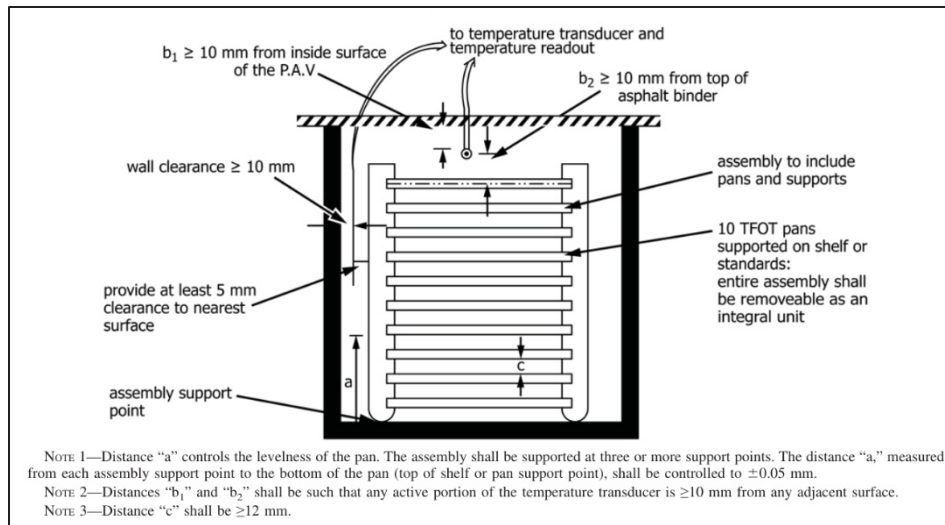


Figure 1.3 Représentation schématique de l'appareil PAV
Tirée de ASTM (2020)

1.2.2.2 Comportement du bitume

Le bitume, étant thermosensible, présente des caractéristiques qui varient en fonction de la température (Di Benedetto, 2011). La Figure 1.4 illustre le comportement mécanique des matériaux, notamment des bitumes et des enrobés bitumineux, en fonction de la température, en mettant l'accent sur leur comportement viscoélastique (Olard, 2003). Elle met en évidence le comportement en relation avec la température et la déformation, distinguant deux domaines, soit fragile et ductile. À basse température ($< \sim 0^\circ\text{C}$), le bitume se comporte de manière élastique linéaire et peut devenir cassant. Le module en cisaillement (G) est utilisé pour décrire le comportement mécanique du bitume et le module élastique (E) est utilisé pour les enrobés. Avec l'augmentation de la température, le comportement du bitume change pour devenir ductile. La température où le comportement du bitume change pour un comportement ductile s'appelle la température de transition vitreuse (T_g). Au-delà de cette température et à de faibles déformations (ϵ), le bitume présente un comportement viscoélastique linéaire, permettant la caractérisation du module complexe en cisaillement G^* et la caractérisation du module E^* des enrobés. À des températures au-dessus de 80°C , le comportement du bitume devient purement visqueux ce qui peut avoir une influence sur les températures de malaxage et compaction.

À des températures élevées, un bitume trop mou accroît les risques d'orniérage dans l'enrobé bitumineux (Ziyani, 2016; Tayfur, Ozen & Aksoy, 2007). À basse température, le comportement fragile du bitume peut entraîner la fissuration thermique de l'enrobé bitumineux (Olard & al., 2005). De plus, les propriétés du bitume évoluent au fil du temps en raison du vieillissement (Perraton, 2013; Hu & al., 2022).

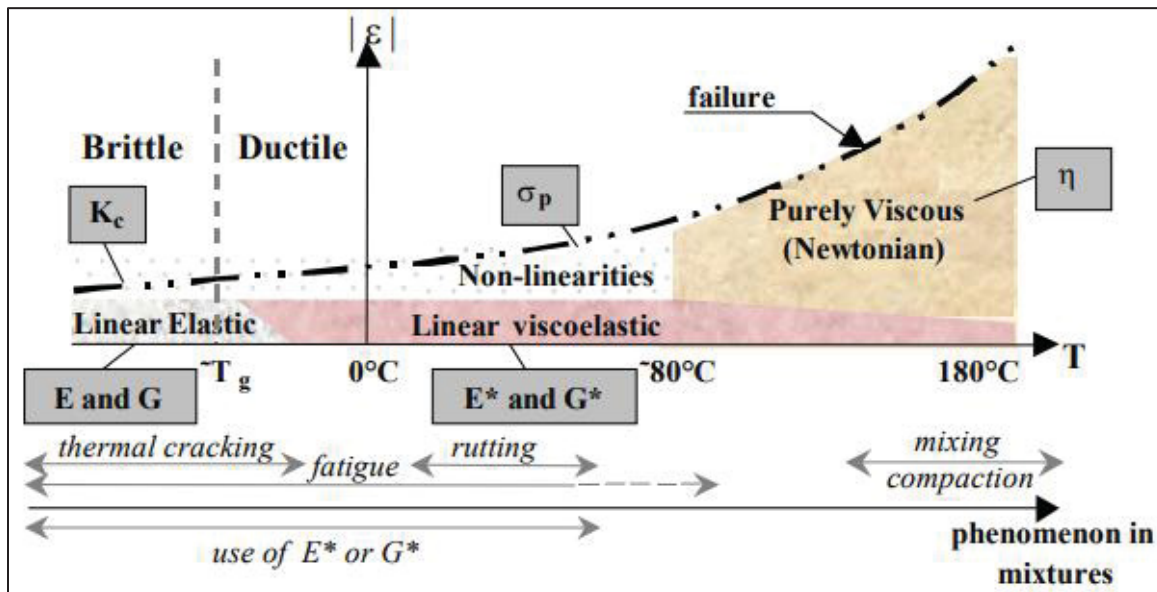


Figure 1.4 Comportement type des liants bitumineux,
(ϵ) déformation et (T) température du liant
Tirée de Olard (2003)

1.2.2.3 Caractérisation des bitumes

La caractérisation des bitumes est essentielle pour comprendre leur comportement et leur performance dans les enrobés bitumineux. Cette section présente les différents types d'essais utilisés pour caractériser les propriétés des bitumes. Le Tableau 1.7 présente la caractérisation des bitumes en fonction des essais rhéologiques (Lamothe, 2004). L'essai de viscosité rotatif permet de caractériser la capacité d'écoulement des bitumes à différentes températures et fournit des informations importantes pour les températures de malaxage et compaction de l'enrobé qui sont établis selon une valeur de viscosité donnée (Yildirim, Ideker, & Hazlett, 2006). L'essai mesure la force nécessaire pour faire tourner une douille immergée dans un

échantillon de bitume à une vitesse constante dans un viscosimètre Brookfield. La viscosité est ensuite calculée en fonction de la résistance au mouvement de la douille et est exprimée en mPa*s. Cet essai permet de déterminer les températures de malaxage (170 ± 20 mPa*s) et compaction (280 ± 30 mPa*s).

Tableau 1.7 Caractérisation des bitumes selon les essais rhéologiques
Adapté de Lamothe (2004)

Essai rhéologique	Caractéristique	Vieillessement ^A			Température d'essai	Exigence
		NV	CT	LT		
Viscosimètre rotatif (RV)	Maniabilité ^B	X			135 et 165°C (très élevée)	Norme 4101* AASHTO T316
Rhéomètre de cisaillement dynamique (DSR)	Résistance à l'orniérage		X		52 à 76 °C (élevée)	Norme 4101* AASHTO T315
Rhéomètre de cisaillement dynamique (DSR)	Comportement viscoélastique	X	X	X	-30 à 70°C	ASTM D7552-09
Rhéomètre de faisceau de flexion (BBR)	Résistance à la fissuration thermique	X ^C		X	-36 à -18°C (Basse)	Norme 4101* AASHTO T313
Récupération de fluage sous contraintes multiples (MSCR)	Résistance à l'orniérage		X ^C		52 à 64°C (élevée)	Norme 4101* AASHTO T350
^A Bitume non vieilli (NV) : bitume d'origine ; Bitume vieilli à court terme (CT) : soumis à l'essai au four à pellicule mince (RTFOT); Bitume vieilli à long terme (LT) : soumis au RTFOT et à l'essai de récipient de Vieillessement sous pression (PAV). ^B Sert à la détermination des températures de malaxage et compactage. ^C Pour le contrôle du bitume et non sa classification. * Exigences spécifiées dans MTMD (2023c).						

Le rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR, *dynamic shear rheometer*) permet de caractériser la rhéologie du bitume sur une large plage de température (AASHTO, 2022a; ASTM, 2014). Deux plaques forment un échantillon cylindrique de bitume. Une plaque étant fixe et l'autre oscille, l'échantillon est soumis à une contrainte de cisaillement sinusoïdale telle

que présentée à la Figure 1.5. Le chargement peut être effectué de deux manières différentes : le contrôle de la contrainte ou la déformation. Le couple appliqué et l'angle de rotation de la plaque mobile sont surveillés en permanence pour calculer le module de cisaillement complexe G^* (Mangiafico, 2014). Les diamètres des plaques et la distorsion appliquée dépendent de la plage de mesure de G^* (Delaporte & al., 2007). Les plaques d'essai de 25 mm ont des espaces de 1 mm et les plaques d'essai de 8 mm avec des espaces de 2 mm sont utilisées pour les températures élevées et moyennes. Pour les basses températures, des plaques de 4 mm avec un espacement de 2 mm peuvent être utilisées.

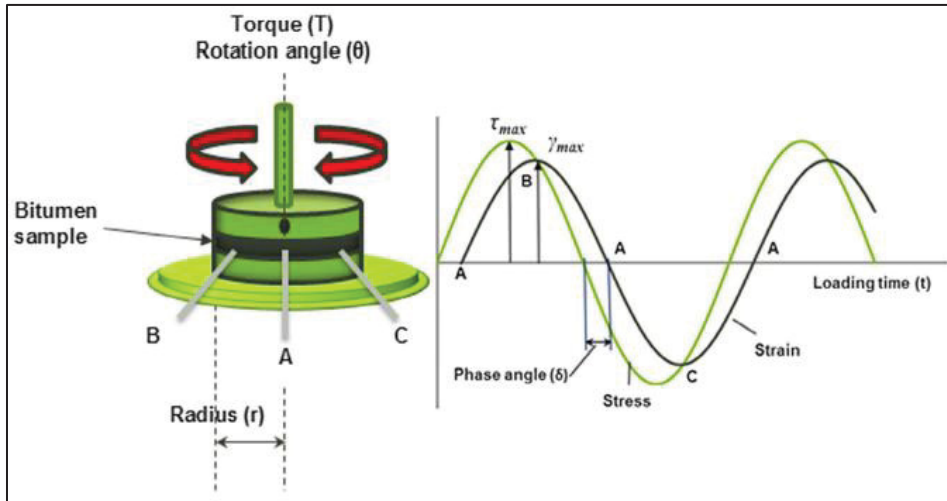


Figure 1.5 Représentation schématique de l'essai
du rhéomètre à cisaillement dynamique
Tirée de Mukandila & al. (2018)

Les valeurs maximales de contrainte et de déformation de cisaillement sont déterminées avec les Équations (1.1) et (1.2) :

$$\tau_{max} = \frac{2 \times T}{\pi \times r^3} \quad (1.1)$$

$$\gamma_{max} = \frac{\theta \times r}{h} \quad (1.2)$$

Avec :

$\tau_{\max}$	Contrainte de cisaillement maximale appliquée, en kPa;
$\gamma_{\max}$	Distorsion maximale, en %;
T	Torque maximal appliqué, en Nm;
r	Rayon de l'éprouvette, en mm;
θ	Angle de déflexion (rotation), en radians;
h	Épaisseur de l'éprouvette, en mm

À partir de $\tau_{\max}$ et $\gamma_{\max}$, il est possible de calculer G^* avec l'Équation (1.3) :

$$G^* = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}} \quad (1.3)$$

Le délai entre le moment de l'apparition de $\tau_{\max}$ et $\gamma_{\max}$ est nommé angle de phase (Φ) et fournit une indication relative du comportement visqueux et élastique du liant bitumineux. Les matériaux ayant un angle de phase de 90 degrés sont complètement visqueux, tandis que les matériaux ayant un angle de phase de 0 degré sont complètement élastiques (Majidzadeh, & Schweyer, 1968; Mandula, & Olexa, 2017). Φ peut être mesuré en secondes, puis converti en mesure angulaire en le divisant par la fréquence d'oscillation (ω), puis en le multipliant par 360° (ou 2π radians). G^* peut être séparé en deux composantes, soit la composante élastique, ou réelle (G'), et la composante visqueuse, ou imaginaire (G'') avec les Équations (1.4), (1.5), (1.6) et (1.7) :

$$G^*(\omega) = G'(\omega) + i \times G''(\omega) \quad (1.4)$$

$$|G^*(\omega)| = \sqrt{G'(\omega)^2 + G''(\omega)^2} \quad (1.5)$$

$$G'(\omega) = G^*(\omega) \times \cos(\Phi(\omega)) \quad (1.6)$$

$$G''(\omega) = G^*(\omega) \times \sin(\Phi(\omega)) \quad (1.7)$$

Avec :

$G^*(\omega)$	Module en cisaillement complexe à la fréquence ω , en kPa;
$G'(\omega)$	Module en cisaillement dynamique réelle à la fréquence ω , en kPa;
$G''(\omega)$	Module en cisaillement dynamique imaginaire à la fréquence ω , en kPa;
$\Phi(\omega)$	Angle de phase à la fréquence ω , en degré;
i	Nombre complexe ($i = \sqrt{-1}$).

De plus, il est possible de calculer Φ avec l'Équation (1.8) :

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} \right) \quad (1.8)$$

La Figure 1.6 présente la relation entre G' , G'' , Φ et G^* pour une température et une fréquence. Un balayage de fréquence, généralement de 0,01 à 10 Hz, est exécuté à plusieurs températures (-34 à 80 °C). Pour chaque couple de température et fréquence, les valeurs sont utilisées pour faire modéliser le comportement du bitume. Il est à noter que cette relation fonctionne aussi pour les modules (E^*) enrobés bitumineux (Di Benedetto & Corté, 2005).

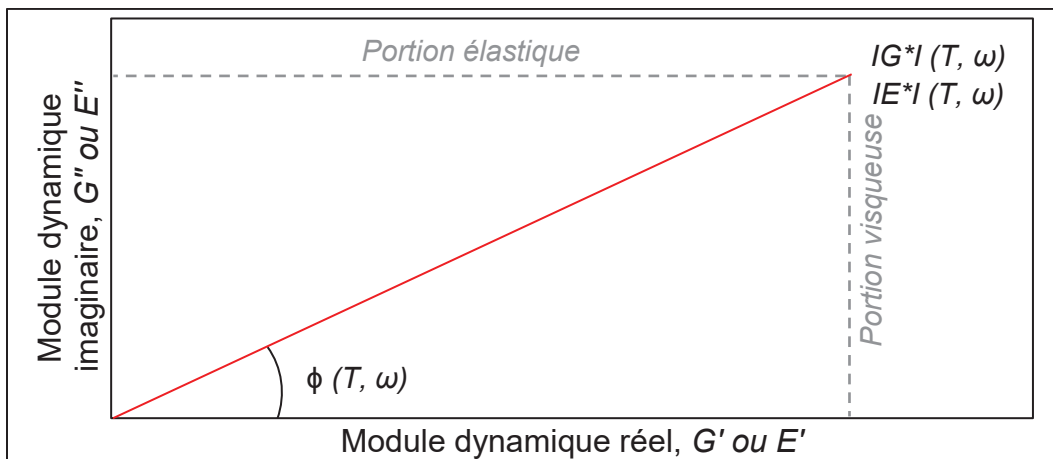


Figure 1.6 Relation entre la viscosité et l'élasticité dans le comportement du bitume

Pour la caractériser la haute température d'utilisation des bitumes, les températures d'essais varient de 46 à 70 °C par incrémentation de 6 °C, la ω est 1.591 Hz (ou 10 rad/s) et la γ visée est 12% (AASHTO, 2022a). Le critère de performance est présenté à l'Équation (1.9):

$$\frac{G^*}{\sin(\theta)} \geq 1,00 \text{ kPa} \quad (1.9)$$

Pour un bitume PG58 par exemple, le critère est respecté lors de l'essai effectué à 58 °C. L'essai de récupération de fluage multicontrainte, ou MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) est une évaluation rhéologique utilisée pour caractériser le comportement viscoélastique des bitumes (Harman., Youtcheff, & Bukowski, 2011). Cet essai vise à mesurer la susceptibilité à la déformation permanente du bitume vieillie à court terme sous différentes contraintes et température, simulant ainsi les conditions rencontrées sur les chaussées. Une forte corrélation avec le phénomène d'orniérage y est observée (D'Angelo, 2009).

Tel que présenté à la Figure 1.7, le bitume est placé dans le DSR et est soumis à un premier niveau de contrainte de 0,1 kPa pendant une période de 1 seconde à une température équivalente à celle de l'utilisation à haute température (T_e). La déformation du matériau est mesurée tout au long de l'essai (AASHTO, 2019). La contrainte est ensuite relâchée pendant une période de 9 secondes, permettant ainsi au matériau de récupérer partiellement de la déformation subie pendant la phase de contrainte. La capacité du bitume à récupérer de la déformation est évaluée sur une série de 10 cycles. Ensuite, la contrainte est augmentée à 3,2 kPa et l'essai se poursuit pendant 10 cycles supplémentaires.

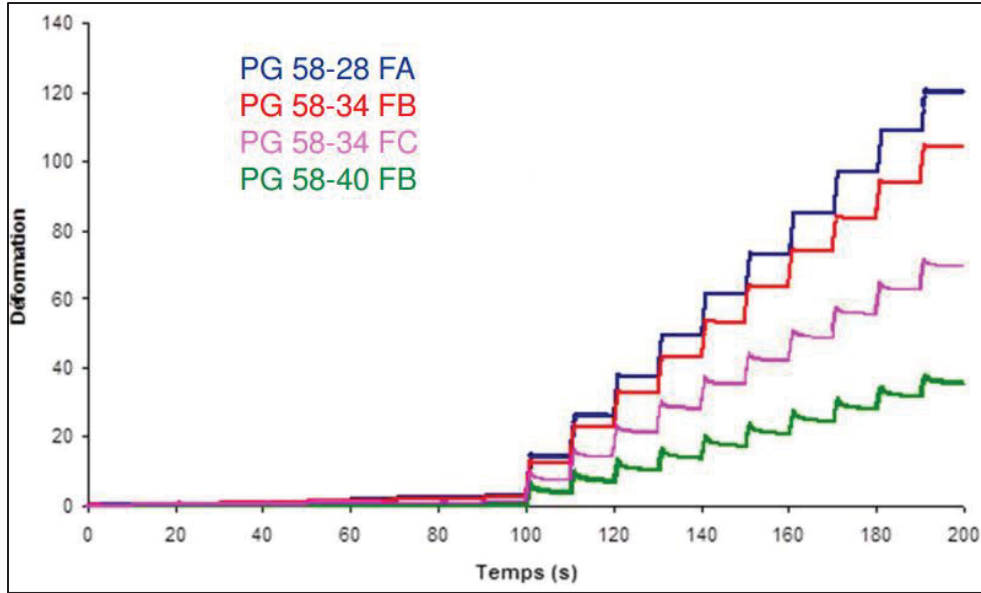


Figure 1.7 Exemples de résultats MSCR
Tirée de Leclerc (2018)

Trois paramètres sont déterminés au moyen des Équations (1.10), (1.11) et (1.12) :

$$R_{3,2} = \frac{\text{Déformation recouvrée}}{\text{Déformation totale}} \times 100 \quad (1.10)$$

$$Jnr_{3,2} = \frac{\text{Déformation non recouvrée}}{\text{Contrainte appliquée}} \times 100 \quad (1.11)$$

$$Jnr_{diff} = \frac{(Jnr_{3,2} - Jnr_{0,1})}{Jnr_{0,1}} \times 100 \quad (1.12)$$

Avec :

- $R_{3,2}$ Récupération élastique à 3,2 kPa, en %;
- $Jnr_{3,2}$ Complaisance non recouvrable, mesurée à 3,2 kPa, en kPa^{-1} ;
- $Jnr_{0,1}$ Complaisance non recouvrable, mesurée à 0,1 kPa, en kPa^{-1} ;
- Jnr_{diff} Différentielle de complaisance non recouvrable, en %.

$R_{3,2}$, $J_{nr0,1}$ et $J_{nr3,2}$ sont calculés à chaque cycle et les moyennes sont utilisées pour vérifier la conformité des bitumes. Le Tableau 1.8 montre les exigences requises au Québec pour l'essai MSCR. Pour tous les types de bitumes, il est impératif que le $J_{nr\text{diff}}$ ne dépasse pas 75%, tandis que le $R_{3,2}$ doit excéder la valeur déterminée par l'équation figurant dans Tableau 1.8. L'exigence relative au $J_{nr\text{diff}}$ sert d'indicateur de la qualité de l'essai et ne s'applique pas aux bitumes de catégorie E et U (MTMD, 2023).

Tableau 1.8 Exigences MSCR pour les bitumes Te n-Tb au Québec
Tiré de MTMD (2023a)

$J_{nr3,2}$	n = S	$\leq 4,50 \text{ kPa}^{-1}$
	n = H	$\leq 2,00 \text{ kPa}^{-1}$
	n = V	$\leq 1,00 \text{ kPa}^{-1}$
	n = E	$\leq 0,50 \text{ kPa}^{-1}$
	n = U	$\leq 0,15 \text{ kPa}^{-1}$
$J_{nr\text{diff}}$	75% max.	
$R_{3,2}$	$\geq 29.371 J_{nr3,2}^{-0.263}$	

L'exigence liée au $R_{3,2}$ constitue un indicateur de la modification appropriée du bitume par le polymère. Les bitumes ayant un $J_{nr3,2}$ plus faible que $0,10 \text{ kPa}^{-1}$ doivent avoir un $R_{3,2}$ minimal de 55%.

Pour caractériser les performances à basse température, l'essai de rhéomètre à poutre de flexion (*Bending Beam Rheometer*, BBR) est utilisé. Le but de l'essai BBR est d'évaluer le comportement du bitume, y compris la rigidité et ses propriétés de relaxation, comme présenté à la Figure 1.8. L'essai de caractérisation se réalise sur un échantillon vieilli à CT et LT (AASHTO, 2020).

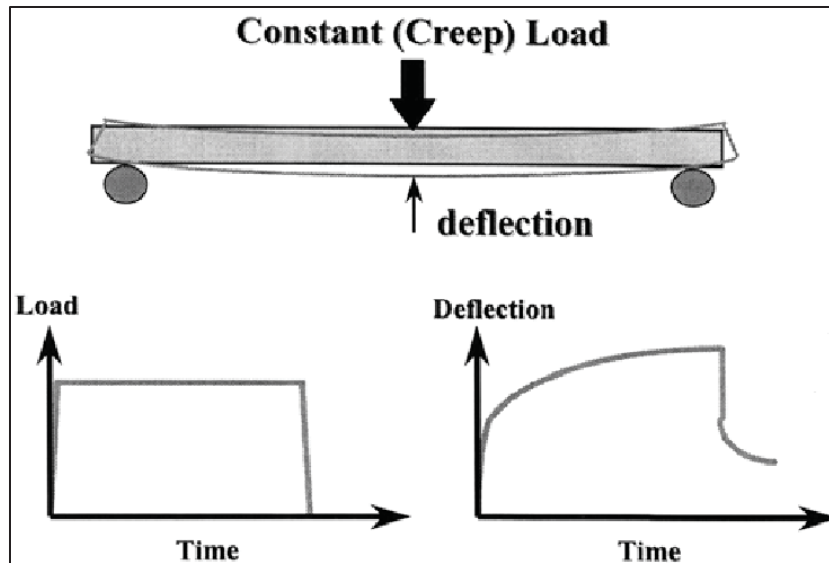


Figure 1.8 Essai de rhéomètre à poutre de flexion (BBR)
Tirée de Rowe & al. (2001)

Plus précisément, le BBR mesure la rigidité à la flexion et au fluage d'une poutre de bitume à une basse température spécifique. L'essai consiste à appliquer une force constante sur la poutre et à mesurer la déformation qui en résulte au fil du temps. La déformation de la poutre est causée par l'application d'une force constante, qui simule les charges de trafic que le liant subira sur le terrain. La rigidité en flexion du bitume est calculée avec l'Équation (1.13) :

$$S_m(t) = \frac{P \times L^3}{4 \times b \times h^3 \times \delta(t)} \quad (1.13)$$

Avec :

$S_m(t)$	Rigidité au fluage en flexion au temps t, en MPa;
P	Charge d'essai mesurée, en mN;
L	Longueur de la portée, en mm;
b	Épaisseur de l'éprouvette, en mm;
h	Profondeur de l'éprouvette, en mm;
$\delta(t)$	Déflexion mesurée au temps t.

Un bitume ayant une rigidité à une température donnée supérieure à 300MPa (lorsque $t = 60s$) est susceptible à la fissuration thermique à cette température (AASHTO, 2023). Un critère d'essai supplémentaire est la "valeur m (m -value)" qui correspond à la tangente de la courbe de fluage au temps de charge de 60 s (la pente, $m(60)$), et a été sélectionné pour fournir une indication de la capacité d'un liant à dissiper les contraintes ou à se détendre. La valeur de $m(60)$ doit être inférieure à 0,300. Les températures d'essais sont réalisées à 10 °C plus élevés que la température de caractérisation. Deux températures d'essais sont requises, soit une qui obtient un résultat au-dessus et en dessous des critères mentionnés précédemment. La température critique du bitume à basse température (T_b) s'obtient avec les Équations (1.14) et (1.15) :

$$T_b(\text{rigidité}) = T_1 + \left\{ [T_2 - T_1] \times \left[\frac{\log(300) - \log[S(60)_1]}{\log[S(60)_2] - \log[S(60)_1]} \right] \right\} - 10 \quad (1.14)$$

$$T_b(\text{pente}) = T_1 + \left\{ [T_2 - T_1] \times \left[\frac{0,300 - m(60)_1}{m(60)_2 - m(60)_1} \right] \right\} - 10 \quad (1.15)$$

Avec :

T_b (rigidité)	Température basse de caractérisation selon la rigidité, en °C;
T_b (pente)	Température basse de caractérisation selon la pente, en °C;
T_1	Température d'essai 1, en °C;
T_2	Température d'essai 2, en °C;
$S(60)_1$	Rigidité au fluage en flexion à la température d'essai 1 à 60s, en MPa;
$S(60)_2$	Rigidité au fluage en flexion à la température d'essai 2 à 60s, en MPa;
$m(60)_1$	Pente de la courbe à 60s pour la température d'essai 1;
$m(60)_2$	Pente de la courbe à 60s pour la température d'essai 2.

La température la plus élevée obtenue parmi les deux paramètres est celle qui correspond à la valeur de la température basse critique du bitume (T_b). De ces deux valeurs, il est possible de déterminer le paramètre ΔT_c qui est un indicateur de l'effet du vieillissement et des additifs sur

la rhéologie du bitume (Baumgardner, 2021). Plus précisément, ΔT_c donne un aperçu des propriétés de relaxation d'un liant bitumineux qui peuvent contribuer à la fissuration non liée à la charge ou à d'autres détresses de fragilisation liées au vieillissement dans un revêtement bitumineux. L'Équation (1.16) permet de calculer ce paramètre :

$$\Delta T_c = T_b(\text{rigidité}) - T_b(\text{pente}) \quad (1.16)$$

Des valeurs plus négatives de ΔT_c sont corrélées à la fissuration par fatigue et à d'autres dégradations liées à de mauvaises propriétés de relaxation. (Anderson & al., 2011 et Li & al., 2017).

D'autres essais sont disponibles pour évaluer diverses propriétés du bitume. L'essai de pénétration, présenté dans la Figure 1.9, est largement employé pour évaluer la consistance des bitumes, c'est-à-dire leur niveau de dureté ou de souplesse à une température spécifique (Airey & al., 2004). Cet essai mesure la capacité d'une aiguille standard, conforme à des spécifications précises, à pénétrer un échantillon de bitume sous une charge standard et à une température déterminée, les résultats étant exprimés en dmm. Il est à noter que dans certains pays, comme la France, les bitumes sont classés en fonction de leur grade de pénétration (Corte, 2001). Par exemple, un bitume 40/50 présente une pénétration à l'aiguille (100g, 25°C) comprise entre 40 et 50 dmm.

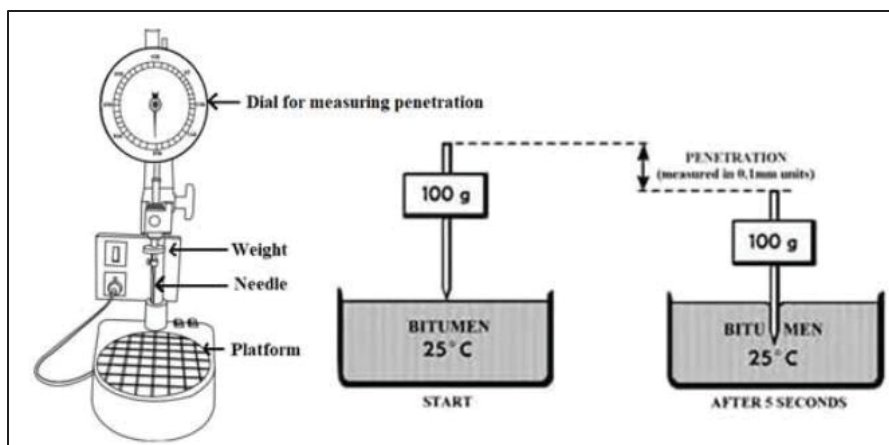


Figure 1.9 Principe de l'essai de pénétration à l'aiguille
Tirée de Group Raha (2023)

L'essai bille et anneau est un essai utilisé pour déterminer la température de ramollissement des bitumes, un paramètre essentiel pour évaluer leur performance à haute température (Zhu & al., 2021). Dans cet essai, présenté à la Figure 1.10, le bitume est d'abord chauffé jusqu'à devenir liquide, puis versé dans deux anneaux métalliques normalisés. Une fois le bitume refroidi et durci, les anneaux sont placés sur un support dans un bain d'eau ou de glycérine. Deux billes en acier de dimensions et de masse normalisées sont ensuite placées sur les échantillons de bitume. Le bain est chauffé à une vitesse constante, généralement à 5 °C par minute. Au fur et à mesure que la température augmente, le bitume commence à se ramollir. L'essai se termine lorsque les billes, sous l'effet de leur propre poids, traversent le bitume ramolli et touchent une plaque située à une distance définie sous les anneaux. La température à laquelle ce contact se produit est enregistrée comme la température de ramollissement du bitume. Ce résultat fournit des informations sur la dureté et la consistance du bitume à des températures élevées. Un bitume ayant une température de ramollissement plus élevée sera généralement plus dur et moins susceptible de ramollir sous des conditions chaudes, ce qui est crucial pour sa performance dans des climats chauds.

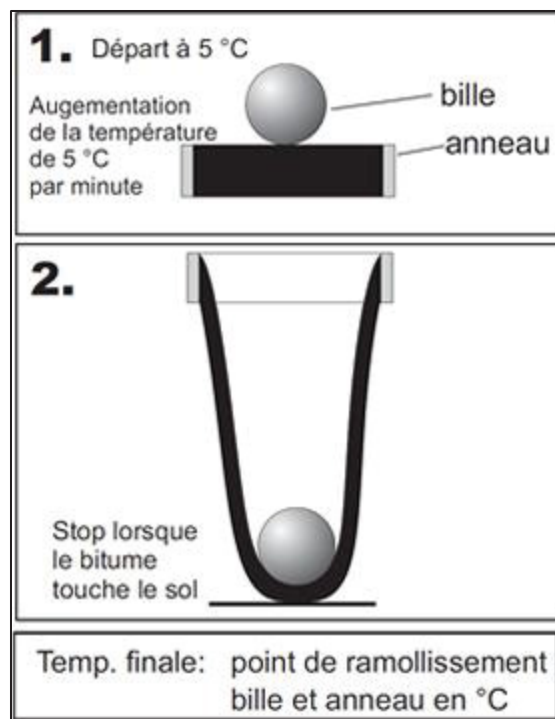


Figure 1.10 Principe de l'essai bille et anneau
Tirée d'Institut für Materialprüfung (2024)

L'essai de recouvrance élastique est un essai pour évaluer la capacité d'un bitume modifié à retrouver sa forme initiale après avoir été déformé, ce qui est particulièrement important pour les applications routières soumises à des charges cycliques et aux déformations (Mashaan & al., 2011). Cet essai consiste à étirer un échantillon de bitume modifié, généralement sous forme de fil (Figure 1.11), à une température contrôlée, puis à relâcher la contrainte pour observer le pourcentage de recouvrance élastique, c'est-à-dire la capacité du bitume à revenir à sa longueur initiale. La température d'essai est souvent choisie pour simuler les conditions de service auxquelles le matériau sera exposé, comme les températures estivales élevées. Un bitume avec une haute recouvrance élastique indique une meilleure capacité à résister à la formation de fissures et à la déformation permanente sous trafic, ce qui est essentiel pour assurer la durabilité et la performance des chaussées. Cet essai est particulièrement pertinent pour les bitumes modifiés avec des polymères, tels que le SBS, qui améliorent la résistance du

bitume aux déformations permanentes et aux fissures induites par la fatigue. Cependant, il a été remplacé par l'essai MSCR, qui offre une précision supérieure (Zoorob & al., 2012).

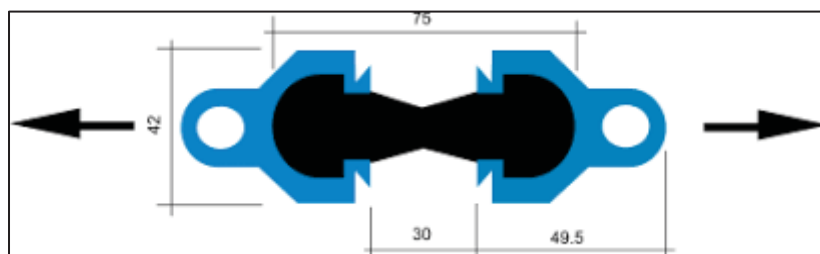


Figure 1.11 Principe de l'essai de recouvrance élastique
Tirée de Group Raha (2023)

L'essai FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), ou spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, est une méthode d'analyse chimique utilisée pour caractériser les bitumes (Nivitha & al., 2016). Cet essai permet d'identifier et de quantifier les composés chimiques présents dans le bitume en se basant sur l'absorption des infrarouges par les liaisons moléculaires. La spectroscopie infrarouge mesure l'absorption d'énergie infrarouge par les liaisons moléculaires des composés présents dans le bitume. Chaque type de liaison (comme les liaisons C-H, C=O, etc.) absorbe une quantité spécifique d'énergie à des longueurs d'onde spécifiques, créant ainsi un spectre caractéristique (Berthomieu & Hienerwadel, 2009). L'échantillon de bitume est exposé à un faisceau d'infrarouges sur une plage de longueurs d'onde spécifique. Le spectromètre enregistre les variations d'absorption d'énergie à différentes longueurs d'onde, comme présenté à la Figure 1.12.

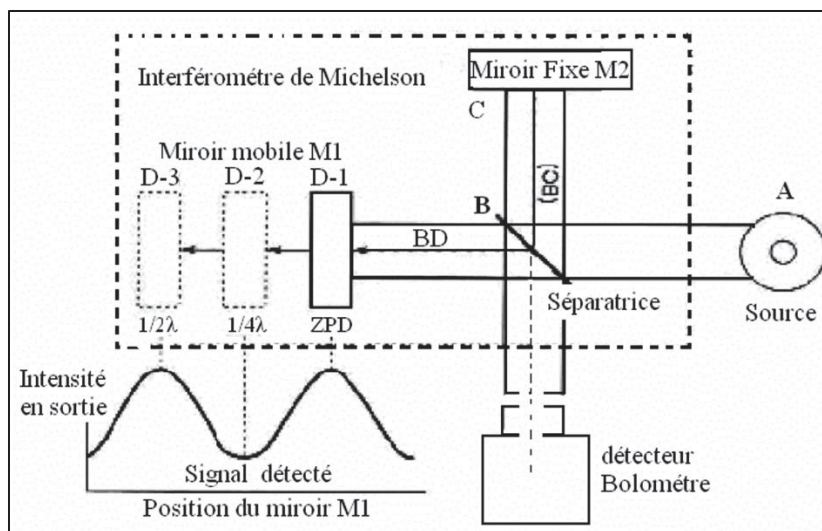


Figure 1.12 Principe de l'essai FTIR
Tirée de El Fatimy (2007)

Le résultat de l'essai est un spectre infrarouge qui représente les différentes fréquences d'absorption en fonction de la longueur d'onde. Chaque pic dans le spectre correspond à une liaison moléculaire spécifique, permettant ainsi d'identifier les composés chimiques présents dans le bitume. L'interprétation du spectre FTIR permet d'identifier les composants tels que les hydrocarbures saturés, insaturés, les groupes fonctionnels, etc. Cette analyse qualitative et quantitative offre des informations sur la composition chimique du bitume (Weigel & Stephan, 2017). Un exemple de résultat à la Figure 1.13 présente les divers composants d'un bitume à différentes longueurs d'onde, illustrant ainsi la répartition des liaisons moléculaires spécifiques dans le spectre infrarouge.

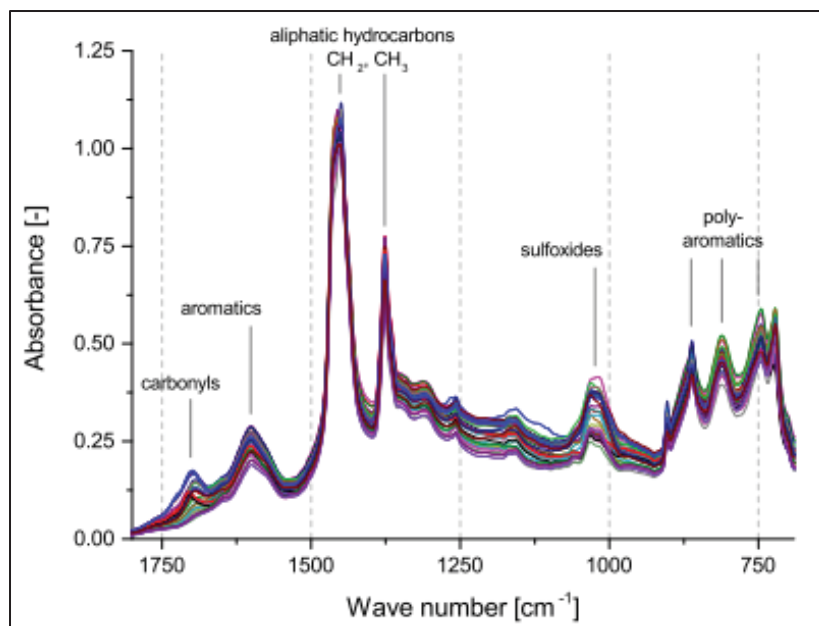


Figure 1.13 Exemple de résultats FTIR
Tirée de Weigel & Stephan (2017)

1.2.2.4 Classification des bitumes

Les premières traces de classification des bitumes datent du 19^e siècle et reposaient sur un essai de mastication (Chattaraj, 2011). Pour cet essai, un inspecteur expérimenté devait mâcher le bitume et décider de son acceptation ou de son rejet. Cette classification était fondée sur une approche empirique, et des problèmes de santé ont été constatés en raison de l'ingestion de bitume (Irvine & al., 2014). En 1888, B.C. Bowen invente l'appareil de pénétration Bowen, qui est l'ancêtre de l'appareil présenté à la Figure 1.9. En 1910, les bitumes ont été ensuite classés selon les résultats de pénétration et le point de ramollissement, nommé grade de pénétration. Cette classification est encore utilisée dans plusieurs pays, tels que la France, l'Australie et la Nouvelle-Zélande (Oliver, 2009; White, 2016; Kodippily, Holleran & Holleran, 2016). En 1960, les États-Unis ont développé une classification basée sur la viscosité à 60 °C, température maximale de l'enrobé en période estivale. La gradation par viscosité, ou *Viscosity Grade* (VG), est encore utilisée dans certains pays, comme l'Inde (Chattaraj, 2011).

Ces méthodes de caractérisations sont toutes sur une base empirique et ne sont pas adéquates pour les nouveaux bitumes fortement modifiés (Cardone & al., 2014).

En 1987, les États-Unis ont financé une étude de 5 ans, nommée *Strategic Highway Research Program* (SHRP), qui a permis de développer une méthode de classification basée sur les performances rhéologiques à basse et à haute température d'utilisation (DSR et BBR) nommée *Performance Grade* (PG T_e - T_b) (Anderson & al., 1994). Un PG 58-28 aura donc des performances adéquates pour des températures d'utilisation entre 58 et -28 °C.

La version la plus récente de classification des bitumes est basée par leur PG T_{en} - T_b , qui caractérise les bitumes selon leur température d'utilisation et leur niveau de sollicitation. C'est la classification utilisée au Québec, où le bitume est classifié basé sur des essais rhéologiques qui déterminent les limites de températures à laquelle le bitume conserve un comportement adéquat (MTQ, 2023a; AASHTO 2023). Par exemple, un bitume PG 58S-28 conserve ses propriétés désirées entre -28°C et 58°C pour un trafic standard. Ces plages de températures sont regroupées par intervalles de 6°C, et cinq catégories de trafic sont utilisées, à savoir standard (S), élevé (H), très élevé (V), extrême (E) et ultime (U) comme indiqué au Tableau 1.8. La caractérisation des bitumes doit être effectuée aux trois états de vieillissement, soit non-vieillie (NV), vieillie à court terme (CT) et vieillie à long terme (LT), comme indiqué au Tableau 1.7.

Le choix du PG pour un projet donné est basé essentiellement sur la position géographique du chantier, le type de route et le rôle de l'enrobé, tel que présenté dans la section au Tableau 1.9. Par exemple, pour la région de Montréal, le PG est de 64E-28 pour tous types d'enrobé pour un trafic élevé (Zone 1).

Tableau 1.9 Choix des bitumes
Tiré de MTMD (2023a)

Type de route	Débit de circulation		Couche de surface			Couche de base et autre couche		
	DJMA	ECAS annuel	Zone 1 PG	Zone 2 PG	Zone 3 PG	Zone 1 PG	Zone 2 PG	Zone 3 PG
Autoroute	> 20 000	> 1E+06	64E-28 ¹	58E-34	---	64E-28	58E-34	---
	< 20 000 > 5 000	< 1E+06 > 5E+05	64E-28	58E-34	---	64H-28	58H-34	---
	< 5 000	< 5E+05	64E-28	58E-34	---	64H-28	58H-34	---
Nationale	> 20 000	> 1E+06	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ²	64H-28	58H-34	52V-40
	< 20 000 > 5 000	< 1E+06 > 5E+05	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ²	64H-28	58H-34	52V-40
	< 5 000	< 5E+05	64H-28	58E-34	52V-40 58H-34 ²	64H-28	58H-34	52V-40
Régionale	> 20 000	> 3E+05	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ²	64H-28	58H-34	52V-40
	< 20 000 > 5 000	< 3E+05 > 1,5E+05	64E-28	58E-34	52V-40 58H-34 ²	64H-28	58H-34	52V-40
	< 5 000	< 1,5E+05	64H-28 ³	58E-34 58S-28 ²	52V-40 58H-34 ²	58S-28	58H-34	52V-40
¹ Le bitume PG 64U-28 THRD est recommandé pour le recouvrement en enrobé de chaussées de béton ou pour les surfaces en enrobé fortement sollicitées par du trafic lourd stationnaire ou circulant à basse vitesse ² Classe de bitume recommandée lorsqu'il s'agit de resurfacement ³ Pour les routes régionales et les rues résidentielles faiblement sollicitées et sans réseau d'autobus, le bitume PG 58S-28 pourrait être utilisé en surface au lieu du PG 64H-28								

1.2.3 Granulats bitumineux récupérés

1.2.3.1 Historique

Les premières traces d'utilisation de GBR proviennent du Texas en 1915 (Willis & West, 2014), mais les agences aux États-Unis ont commencé à l'introduire dans les méthodes de formulation au début des années 1970 (Hall, 2009), période marquée par le premier pic pétrolier (Lescaroux & Mignon, 2008). En 1978, 41 états permettaient l'utilisation du GBR dans les nouveaux enrobés. Aujourd'hui, tous les états américains et les provinces canadiennes approuvent l'utilisation du GBR dans les nouveaux enrobés bitumineux. Au Canada, la limite

permise varie à des teneurs de 10% à 30% massique par rapport à la masse totale de l'enrobé bitumineux et varie d'une province à l'autre. Au Québec, le ministère des Transports du Québec (MTQ), aussi appelé ministère des transports et de la mobilité durable (MTMD) limite l'utilisation du GBR à 10% pour les couches de surface et 20% pour les couches de base (Hein & Schaus, 2020).

Le GBR est un matériau issu des routes en fin de vie. Comme présenté à la Figure 1.14, la portion d'enrobé est enlevée à l'aide d'une pelle mécanique ou d'équipements plus spécialisés (Copeland, 2011). Le GBR est ensuite concassé à l'aide d'un concasseur mécanique. Il est composé de granulats et de bitume oxydé provenant de plusieurs routes d'une même région. Ces routes sont constituées de différents enrobés, sont d'âge différent et n'ont pas été exposées aux mêmes conditions météorologiques et aux mêmes contraintes lors de leur vie, donc les bitumes n'ont pas toutes les mêmes caractéristiques. De plus, le fait que tous les GBR soient accumulés ensemble dans une pile peut entraîner une variabilité dans leurs propriétés (Austerman, Mogawer, & Stuart, 2020; Zaumanis, Oga, & Haritonovs, 2018).



Figure 1.14 Fabrication des GBR

L'utilisation de GBR est aujourd'hui présente dans la quasi-totalité du monde. Le Japon est un des plus grands utilisateurs de GBR au monde (Kanou & al., 2010; IDRRIM, 2021). Dû à sa forte densité de population et la faible superficie du pays, le Japon tend à minimiser les sites d'enfouissements tout en réduisant la quantité utilisée de matériaux vierges. En moyenne, les enrobés contiennent 31 % de GBR, mais certaines régions acceptent des teneurs plus élevées que 45 % (Kubo & Leader, 2014). Il est à noter que les réserves de granulats au Japon sont

rares et qu'ils doivent importer la majorité des granulats pour les enrobés (Kida & Kwahigashi, 2015).

Les pays nordiques d'Europe utilisent des additifs tièdes pour diminuer la viscosité du bitume et favoriser la compaction par temps froid. Les techniques d'enrobage à froid et les additifs tièdes ont fait l'objet de plusieurs études (Hugener & al., 2014; Larsen & al., 2004; Dinis-Almeida & al., 2016). L'Islande quant à elle approuve des teneurs en GBR de 35 et 45 % pour les couches de surface et de base, respectivement. Avec une production d'enrobé annuelle d'environ 250 000 T, le pays privilégie l'utilisation des techniques d'enrobage à tiède et des régénérants à bitume pour faciliter la mise en œuvre des enrobés à fort taux de GBR par temps froid (Kristjánsdóttir & al., 2007). Les températures moyennes en hiver sont -10 °C, mais peuvent aller jusqu'à -25 à -30 °C (Fikke, Kristjánsson & Nygaard, 2008). La Suède elle impose un taux de GBR minimal de 10 % pour tous les nouveaux enrobés fabriqués (Miliutenko, Björklund & Carlsson, 2013). Aux Pays-Bas, 73 % des nouvelles formules contiennent du GBR (Molenaar & Mohajeri, 2014).

1.2.3.2 Caractérisation des granulats bitumineux récupérés

Étant constitués de granulats enrobés de bitume, les essais de caractérisation des granulats et du bitume sont appliqués sur les GBR. Ainsi, trois types de caractérisations sont réalisés : celle des GBR, celle des granulats et celle du bitume extrait des GBR. Deux techniques sont proposées pour séparer le bitume et les granulats, soit l'extraction au solvant et au four à ignition.

Pour évaluer la teneur en bitume d'un échantillon de GBR ou d'enrobé bitumineux, un échantillon est d'abord séché puis pesé avant l'extraction. L'échantillon est placé dans la chambre d'extraction de l'appareil et ajoutez le trichloréthylène (TCE), un solvant qui dissout le bitume sans affecter les agrégats minéraux (MTMD, 2023a). L'extracteur chauffe le solvant pour faciliter la dissolution du bitume, un processus souvent accéléré par l'agitation ou la rotation de l'échantillon. Après l'extraction, le mélange de TCE et de bitume dissous est filtré

pour en retirer les agrégats minéraux non dissous. Le filtrat, contenant le TCE et le bitume, passe ensuite par une phase d'évaporation, généralement réalisée avec un évaporateur rotatif qui permet de séparer le bitume pur du TCE, tel que présenté à la Figure 1.15 (Zhao, Huang, & Shu 2015). Le bitume résiduel est pesé pour déterminer la quantité extraite par rapport à la masse initiale de l'échantillon. La teneur en bitume est ensuite calculée en pourcentage de la masse totale de l'échantillon initial. Enfin, il est crucial de manipuler et d'éliminer le TCE utilisé selon des procédures strictes de sécurité et environnementales, en raison de sa toxicité et de son potentiel nocif (Frant & Westendorp, 1950).

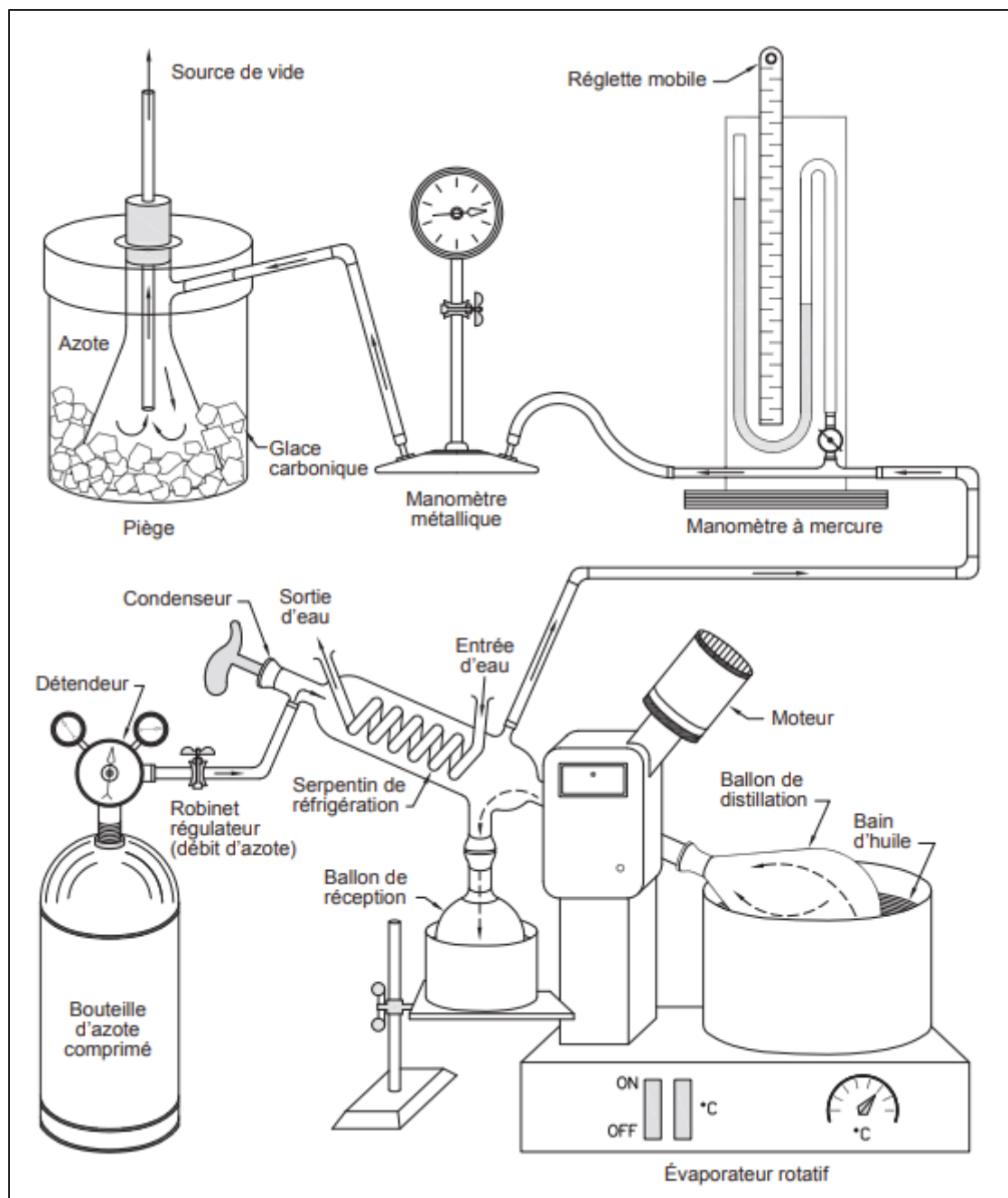


Figure 1.15 Montage expérimentale d'une évaporation rotative
Tiré de MTQ (2014)

Pour les enrobés à taux élevé de GBR ($> 20\%$), c'est la meilleure technique actuellement, suivie de la caractérisation des particules grosses et fines séparément (West & al., 2013). Les GBR sont placés dans un récipient approprié, auquel on ajoute du trichloréthylène, un solvant

organique. Le TCE a la capacité de dissoudre le bitume tout en laissant les granulats et d'autres matériaux non solubles (Ge & al., 2019). Ensuite, le récipient contenant l'échantillon et le trichloréthylène est agité pour faciliter la dissolution du bitume dans le solvant. La phase liquide, composée du bitume et du TCE, est ensuite récupérée et déposée dans une centrifugeuse pour éliminer les particules solides fines. Enfin, le liquide est transvasé dans un ballon de distillation, où une évaporation rotative est réalisée, comme illustré à la Figure 1.15. Le bitume est finalement récupéré et les essais de caractérisations discutés à la section 1.2.2.3 peuvent être effectués.

L'essai par ignition implique le placement du GBR dans un four à haute température, entre 450 et 540 °C (MTMD, 2023a). Le bitume est alors brûlé, laissant les granulats et autres composants non volatils. En comparant les masses initiale et finale, la teneur en bitume des GBR peut être déterminée. Il est à noter qu'un facteur de correction est appliqué pour corriger la teneur en bitume réelle des GBR, variant de 0,00 à 0,83 % (Nener-Plante, Nash, & Robinson, 2023). Le facteur de correction varie principalement de la source granulaire et de la teneur en filler du GBR. Les granulats peuvent ensuite subir les mêmes essais que ceux mentionnés dans la section 1.2.1.1. La granulométrie des granulats extraits des GBR est nommée "courbe blanche". Les enrobés contenant des granulats de dolomites sont affectés davantage par la température du four à ignition. La dolomite se fracture lorsqu'elle est exposée à de très hautes températures (< 325 °C) et change la granulométrie de l'enrobé (Kowalski & al., 2010). Une autre technique pour déterminer la densité brute des granulats est proposée dans un rapport du *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) à partir de l'essai de densité maximale (dmm) sur le GBR (McDaniel & Anderson, 2001). Par contre, cette méthode n'est pas recommandée pour les enrobés à fort taux de GBR, car elle peut faire dévier la valeur de VMA de plus de 0.5 % (West & al., 2013).

L'avantage principal de la méthode par ignition réside dans le fait qu'elle n'utilise pas de solvant qui est néfaste pour la santé des utilisateurs. Cependant, cette méthode ne permet pas de récupérer le bitume des GBR. Pour récupérer le bitume dans ce cas, la méthode par extraction au TCE doit être employée.

Il est possible de réaliser une analyse granulométrique similaire à celle utilisée pour les granulats, connue sous le nom de "courbe noire". Au niveau de la caractérisation des granulats issus du GBR, la granulométrie et la densité brute des granulats sont deux propriétés nécessaires à la formulation. La densité des granulats du GBR a un impact critique pour la détermination des propriétés de l'enrobé comme les vides intergranulaires (VMA) (Giustozzi & al., 2015).

1.3 Composition de l'enrobé bitumineux

En règle générale, la composition d'un l'enrobé est d'environ 95 % massique par rapport à sa masse totale, composée de granulats, et 5 % de bitume (Liu & al., 2011). Avec une densité brute moyenne des granulats de 2,700 et une densité du bitume avoisinant 1,020, une représentation volumétrique permet de calculer l'espace occupé par chaque composant. Cette section expose les relations poids-volume des enrobés bitumineux.

1.3.1 Propriétés volumétriques

La Figure 1.16 présente sous forme de diagramme de phase les composants d'un enrobé bitumineux. Les informations des granulats sont d'abord évaluées selon les méthodes mentionnées aux sections 1.2.1.1 et 1.2.2.3 ou fournies avec les fiches techniques. Deux essais sont nécessaires pour déterminer les propriétés volumiques, soit l'essai de densité maximale, ou d_{mm} , et l'essai de compactabilité pour la teneur en air (%) dans l'enrobé.

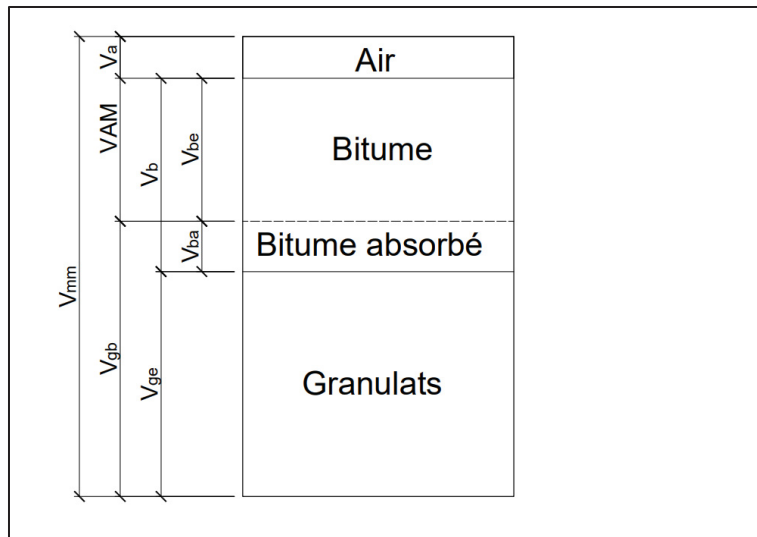


Figure 1.16 Diagramme de phase d'un enrobé bitumineux

Les Équations (1.17) et (1.18) permettent de déterminer les proportions massiques des composants dans l'enrobé :

$$P_b = \frac{M_b}{M_m} * 100 = \frac{M_m - M_{gb}}{M_m} * 100 \quad (1.17)$$

$$P_g = 100 - P_b \quad (1.18)$$

Avec :

- P_b Masse totale de bitume, exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé;
- M_b Masse totale de bitume, exprimée en gramme;
- M_m Masse totale de l'enrobé, exprimé en gramme;
- M_{gb} Masse totale des granulats, exprimée en gramme;
- P_g Masse totale des granulats, exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé.

La densité effective des granulats, ou d_{ge} (schématisé à la Figure 1.17), se définit comme le rapport entre la masse dans l'air d'un volume unitaire d'un matériau perméable (en excluant les

vides perméables au bitume) et la masse dans l'air d'un volume équivalent d'eau distillée et désaérée, ayant la même densité. Elle prend en considération les vides perméables à l'eau et imperméables au bitume. Le bitume ayant pénétré les vides perméables à l'eau est nommé bitume absorbé (P_{ba}).

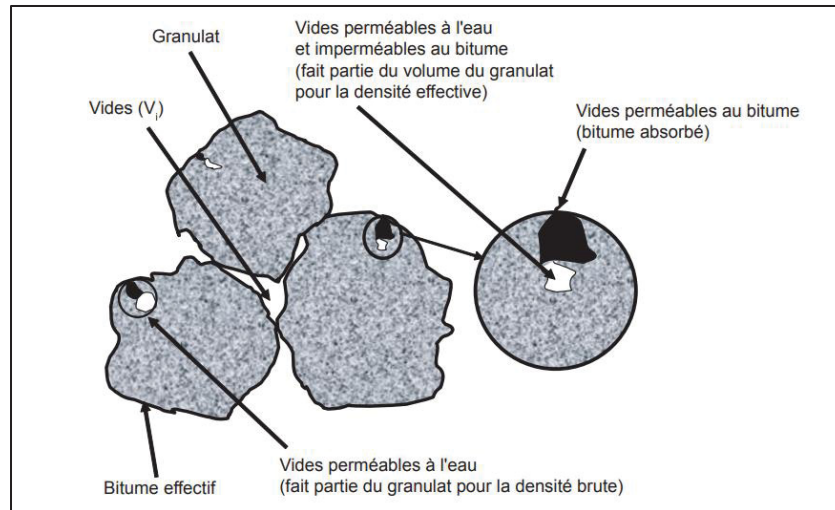


Figure 1.17 Représentation des vides dans les granulats d'un enrobé
Tirée de Perraton (2013)

Les Équations (1.19) et (1.20) sont pour déterminer d_{ge} et P_{ba} , respectivement :

$$d_{ge} = \frac{P_g}{\frac{P_m}{d_{mm}} - \frac{P_b}{d_b}} \quad (1.19)$$

$$P_{ba} = \left(\frac{1}{d_{gb}} - \frac{1}{d_{ge}} \right) * 100d_b \quad (1.20)$$

Avec :

d_{ge} Densité du granulat effective;

P_m Masse totale de l'enrobé, exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé ($P_m = 100$);

d_{gb}	Densité du granulat brute;
d_{mm}	Densité maximale de l'enrobé (teneur en vides = 0%);
d_b	Densité du bitume;
P_{ba}	Pourcentage de bitume absorbé, exprimé en pourcentage par rapport à la masse totale de l'enrobé.

La densité brute du matériau (d_{mb}) est la densité de l'enrobé en prenant en considération les vides interstitiels (V_i) après compaction. Elle est obtenue à l'aide de l'Équation (1.21) :

$$d_{mb} = d_{mm} - \frac{d_{mm} \times V_i}{100} \quad (1.21)$$

Avec :

d_{mb}	Densité brute de l'enrobé;
V_i	Volume des vides interstitiels, exprimé en pourcentage par rapport au volume de total de l'enrobé.

La masse de bitume effective (m_{be}) est la quantité réelle de bitume qui est présente et contribue aux propriétés du mélange. Elle exclut le bitume absorbé par les agrégats. En d'autres termes, la masse de bitume effective représente la masse de bitume qui est réellement disponible pour lier les agrégats dans le mélange asphaltique. Cette masse peut être convertie en volume de bitume effectif (V_{be}). V_{be} est un paramètre décisif dans les spécifications de la formulation d'enrobé au Québec. Les Équations (1.22) et (1.23) permettent de calculer ces deux paramètres :

$$m_{be} = \left(\frac{P_m}{d_{mm}} - \frac{P_g}{d_{gb}} \right) * d_b \quad (1.22)$$

$$V_{be} = \left(\frac{m_{be}}{d_b} * \frac{d_{mm}}{P_m} \right) * 100 \quad (1.23)$$

Avec :

m_{be}	Masse de bitume effective, exprimé en pourcentage de la masse de l'enrobé;
V_{be}	Volume de bitume effectif, exprimé en pourcentage du volume de l'enrobé à 0% de vides.

Les vides intergranulaires, nommés VAM, désignent le volume d'espace ou de vides entre les particules de granulat dans le mélange d'enrobé compacté. Le VAM, un paramètre crucial dans certaines méthodes de formulation, influence la quantité de bitume qui peut être efficacement enduite sur les particules d'agrégats. De même, les vides comblés par le bitume, ou VCB, indiquent la proportion des vides granulaires qui sont remplis de bitume dans un enrobé compacté. Les Équations (1.24) et (1.25) permettent de déterminer VAM et VCB, respectivement :

$$VAM = \left(\frac{V_{be}(100 - V_i)}{100} \right) + V_i \quad (1.24)$$

$$VCB = \frac{VAM - V_i}{VAM} \times 100 \quad (1.25)$$

Avec :

VAM	Vides intergranulaires, exprimés en pourcentage du volume de l'enrobé;
VCB	Vides comblé par le bitume, exprimé en pourcentage du volume de l'enrobé.

1.3.1.1 Degré d'activation du bitume des GBR

L'un des principaux défis liés à l'utilisation des GBR est la réactivation du bitume vieilli et rigide. Ce bitume, difficile à mobiliser lors du processus de malaxage, nécessite souvent l'ajout de liant neuf pour être efficacement activé (Lo Presti & al., 2020). L'activation du bitume des GBR réduit le besoin en bitume neuf, mais complique également la détermination du V_{be} . Cette complexité peut poser des problèmes de formulation, surtout lorsque le V_{be} est un paramètre crucial à respecter.

Le bitume des GBR se présente donc sous trois formes, tel que présenté à la Figure 1.18 : immobilisé ("*black rock*"), visqueux, et efficacement mobilisé (pouvant servir de colle pour enrober les agrégats) (Ma & al., 2021). Certaines études démontrent que la mobilisation du bitume des GBR n'est pas totale et que les trois formes s'y retrouvent (Sreeram & Leng, 2019; Hettiarachchi & al., 2020). La température, la source du GBR et la dimension des GBR jouent un rôle important sur le degré de mobilisation (Li & al., 2022; Salianni & al., 2019). La mobilisation du bitume des GBR est essentielle pour la performance du mélange, y compris la résistance à la fissuration et à l'humidité.

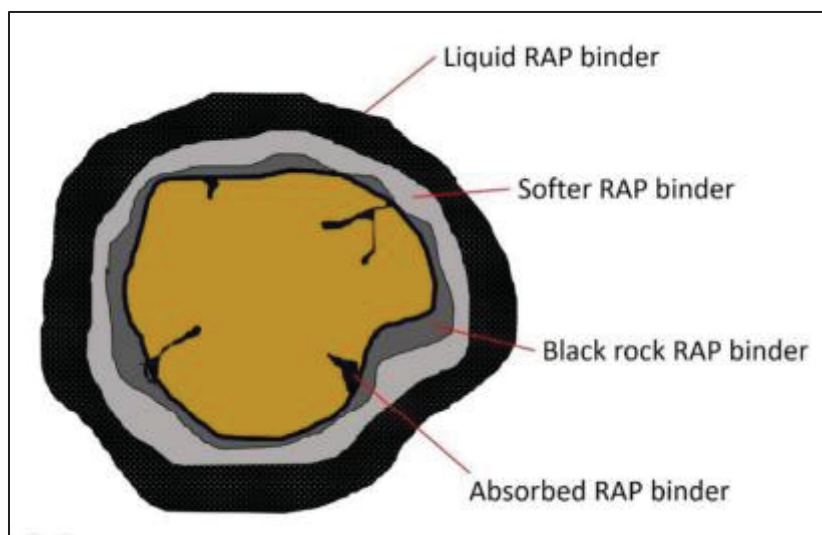


Figure 1.18 Composition schématique d'un GBR
Tirée de Hettiarachchi & al. (2020)

1.4 Fabrication des enrobés en laboratoire

Le malaxage des enrobés en laboratoire est une étape cruciale dans la préparation des échantillons pour l'analyse des propriétés physiques et mécaniques des enrobés bitumineux. Ce processus vise à reproduire les conditions de malaxage utilisées sur les chantiers routiers afin d'obtenir des échantillons représentatifs. La première étape consiste à peser les quantités requises de granulats et de bitume. Les matériaux sont préchauffés à la température spécifiée

selon les résultats de viscosité (section 1.2.2.3), garantissant une consistance optimale pendant le malaxage. Les matériaux granulaires sont surchauffés de + 15 °C pour contrebalancer la perte de chaleur lors des manipulations, qui permet le contrôle de la température lors du malaxage (MTQ, 2019). Les granulats sont placés dans le malaxeur, suivi de l'ajout du bitume selon les proportions définies (Wu & al., 2018). Les paramètres de malaxage tels que la vitesse et la durée sont configurés conformément aux spécifications du malaxeur. Un temps de malaxage minimal est nécessaire pour assurer l'enrobage complet des granulats et un temps de malaxage trop long augmente le vieillissement du bitume (Bražiūnas, Sivilevičius, & Virbickas, 2013).

L'ajout de GBR nécessite des ajustements dans le processus de conditionnement des matériaux. Au Québec, la température maximale de chauffage est limitée à 60 ± 5 °C afin de prévenir une oxydation excessive du bitume provenant des GBR (MTMD, 2023). Le conditionnement du GBR à cette température est effectué pour éliminer toute trace d'eau, et la période de conditionnement peut s'étendre jusqu'à 3 jours. Pour atteindre une température équivalente à celle du malaxage, les granulats vierges sont surchauffés, tout en veillant à ne pas dépasser la limite de 190 °C. En cas de taux élevés de GBR (> 20 %), il est recommandé d'augmenter la durée de malaxage afin d'améliorer la dispersion et l'homogénéité des bitumes neufs et des GBR (Gao & al., 2022). La Figure 1.19 présente la distribution du bitume d'apport et des GBR lors d'un malaxage.

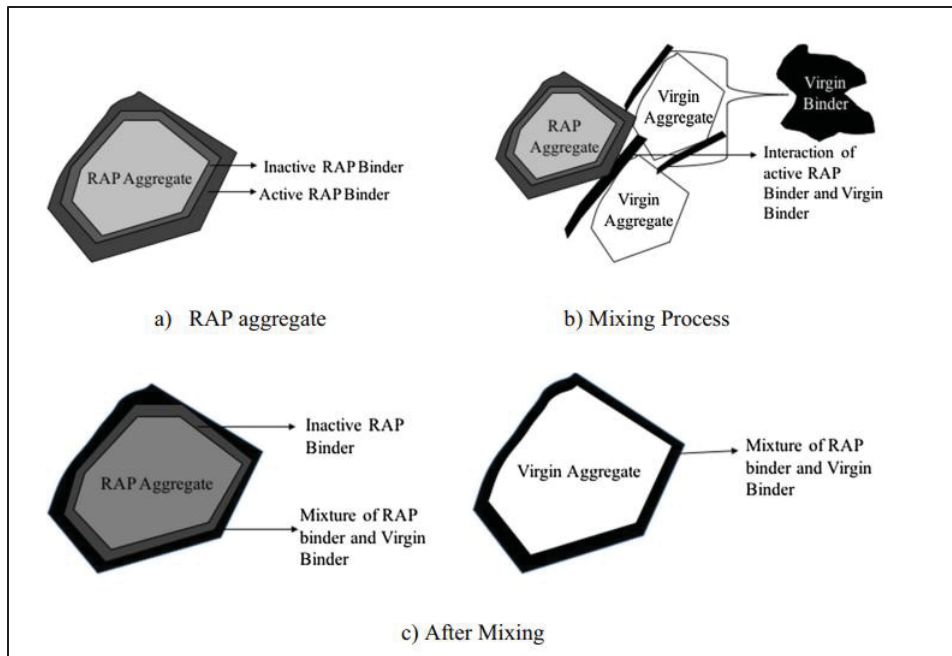


Figure 1.19 Distribution des bitumes lors du malaxage
Tirée de Sreeram & Leng (2019)

1.5 Propriétés et performances des enrobés bitumineux

Dû aux propriétés thermosensibles du bitume, la température cause à l'enrobé bitumineux un changement de rigidité (Gayte, 2016). Plus la température baisse, plus l'enrobé bitumineux est rigide et peut montrer un comportement fragile suite aux propriétés du bitume à basse température (Di Benedetto & Corté, 2005). Inversement, l'enrobé ramollit avec l'élévation de la température. De plus, l'amplitude de la déformation affecte le comportement de l'enrobé tel que présenté à la Figure 1.20. Elle explique quatre types de comportements principaux dans les enrobés bitumineux (Di Benedetto, 1990) :

- Lorsque les chargements comprennent des centaines de cycles et que l'amplitude des déformations est plus faible que 10^{-4} m/m, le comportement est considéré comme viscoélastique linéaire.
- Au-delà de cette amplitude ($> 10^{-4}$ m/m), le comportement est fortement non linéaire pour un faible nombre de cycles de chargements.

- Lors de chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations de faible amplitude, le matériau développe un endommagement nommé fatigue.
- Lorsque des cycles de contrainte sont appliqués à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles non négligeables se produisent pour des amplitudes de déformation proches de la rupture. L'accumulation de ces déformations crée l'orniérage.

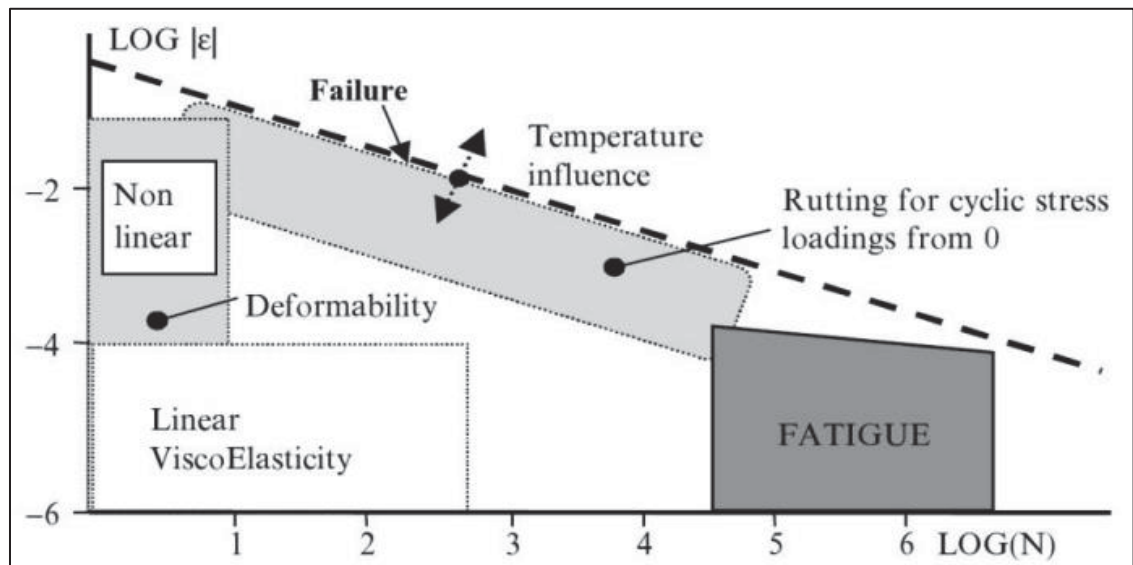


Figure 1.20 Comportement type des enrobés bitumineux,
(ϵ) déformation et (N) nombre de cycles de chargements
Adaptée de Di Benedetto (1990)

1.5.1 Compactabilité

L'essai de Presse à Cisaillement Giratoire (PCG), souvent utilisé dans l'évaluation de l'aptitude à la compaction des enrobés bitumineux, est un essai crucial pour la méthode de formulation et l'évaluation de la résistance au cisaillement des mélanges d'enrobés (Babagoli, Norouzi, & Ameli, 2021). L'essai simule les conditions de compactage des enrobés bitumineux sur les routes en appliquant une charge de cisaillement tout en compactant l'échantillon de manière giratoire, comme indiqué à la Figure 1.21. Cela permet d'évaluer la capacité du mélange à atteindre une teneur en vides cible et sa résistance au cisaillement sous des conditions de chargement similaires à celles rencontrées en service. La température de compaction est basée

sur la viscosité du bitume, où elle doit être à 280 ± 30 mPas*s (Section 1.2.2.2). Pour les enrobés contenant du GBR, la température de compaction est généralement maintenue constante jusqu'à une teneur de 20 %. Au-delà de ce pourcentage, elle peut être augmentée. Cependant, une augmentation de la température de compaction n'améliore pas nécessairement la compactabilité de l'enrobé lorsque le taux de GBR est élevé (Ma, Leng, Wang, & Zhou, 2020). L'effet des GBR sur la compactabilité dépend principalement de leur proportion et des caractéristiques des granulats, telles que la granulométrie et la surface spécifique (Yang et al., 2021).

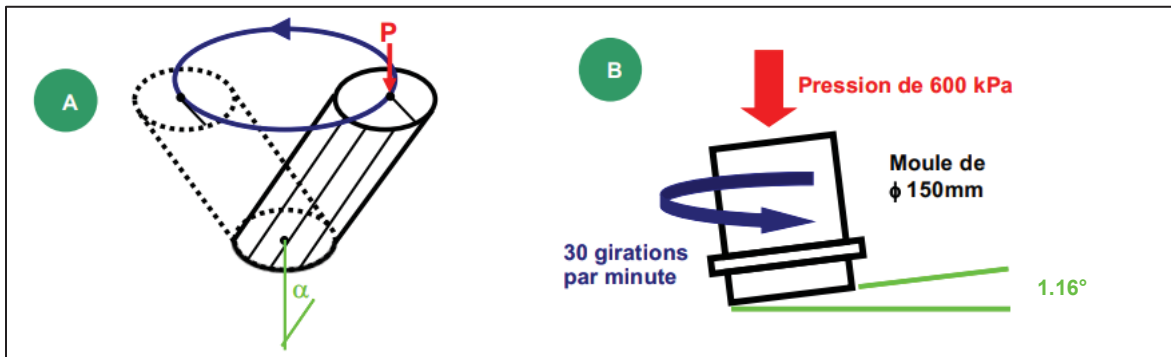


Figure 1.21 Illustrations du procédé de la PCG : physique (a) et mécanique (b)
Tirée de Perraton (2013)

1.5.2 Orniérage

Les ornières sont des dépressions longitudinales formées sur les routes par le passage répété de véhicules lourds. Ces creux suivent les traces des roues et leur taille varie selon la répartition de la charge et l'épaisseur de l'enrobé ou des fondations (Golalipour & al., 2012). Les ornières de petit rayon, ou souvent doubles, sont dues aux camions à deux roues, tandis que celles de grand rayon, ressemblant à des paraboles élargies, résultent de déformations plastiques dans la fondation granulaire (Moghaddam & al., 2011). Les ornières de petit rayon sont associées aux couches de surface, tandis que celles de grand rayon concernent les couches structurales inférieures (Lamothe, 2004). Ces déformations peuvent réduire la sécurité routière et le confort de conduite. Les causes principales d'ornières à faibles rayons sont liées aux matériaux bitumineux, incluant notamment des niveaux inappropriés de bitume ou de vide, des charges

excessives, l'utilisation de sable naturel roulé, un concassage insuffisant des granulats, ou un mauvais comportement du bitume à haute température (Lamothe, 2004). L'ajout des GBR dans les enrobés bitumineux a un impact significatif sur les performances à l'orniérage des chaussées. Le bitume vieilli dans les GBR est plus rigide comparé au bitume neuf et peut améliorer la résistance à l'orniérage (Meroni & al., 2021). Cependant, d'autres caractéristiques des GBR, comme la qualité des granulats, la teneur en bitume et le degré de vieillissement du bitume peuvent nuire aux performances à l'orniérage (Saha & al., 2017).

De nombreux essais existent pour évaluer la capacité des enrobés à résister aux déformations permanentes, avec la majorité axée sur leur résilience face aux contraintes répétées, imitant le trafic de poids lourds (Javilla & al., 2017; Topal & al., 2017; Du & al., 2018). Ces essais visent spécifiquement à reproduire et quantifier la formation d'ornières, qui sont des affaissements ou des fosses créés sur les routes sous l'effet du trafic intense, comme illustré à la Figure 1.22. Au Québec, l'essai de référence utilise l'appareil français (Figure 1.20 c)), suivant la méthode LC 26-410 (MTQ, 2014). Les échantillons compactés sont conditionnés à une température élevée, typique des conditions estivales, qui accentuent le risque d'orniérage. Un dispositif spécialisé est utilisé pour appliquer une charge mobile sur l'échantillon, habituellement via une roue simulant le passage des véhicules. Cette charge est appliquée de façon récurrente sous une pression et une vitesse déterminée, et la profondeur des ornières ainsi formées est mesurée après un nombre spécifié de cycles, ou de passages de la roue. Au Québec, l'essai français est utilisé pour évaluer les performances à haute température des enrobés.

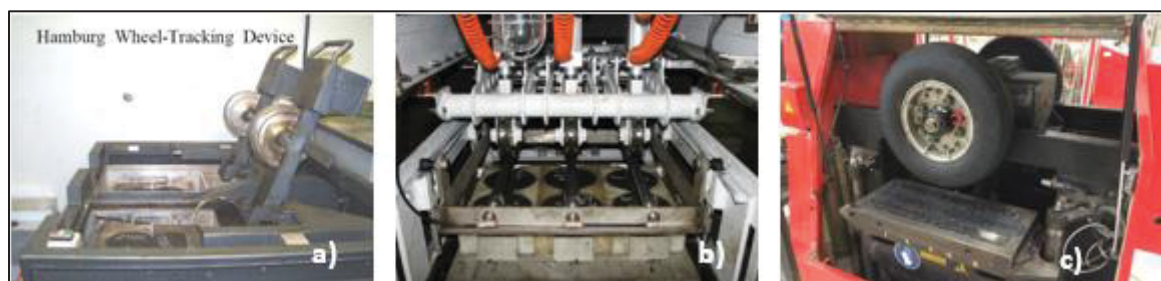


Figure 1.22 Essais d'évaluation d'orniérage : a) Essai Hamburg;
b) Essai *Asphalt Pavement Analyser* et c) Essai français
Adapté de Timm & al. (2009)

1.5.3 Comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux

Pour évaluer la rigidité d'un enrobé bitumineux, l'essai de module complexe permet d'introduire les paramètres de températures et de vitesse de sollicitation au comportement de l'enrobé. Pour ce faire, des centaines de petites déformations ($\sim 50 \mu\text{m/m}$) en tension-compression sont appliquées sur une éprouvette à différentes fréquences (20 à 0,01 Hz) et température (-35 à 40°C) dans une presse servovalve de type MTS (Badeli, Carter & Doré, 2018). La géométrie des éprouvettes pour l'évaluation du module complexe (E^*) est généralement de forme cylindrique prélevée d'un enrobé bitumineux compacté à la PCG ou une plaque compactée au compacteur LCPC (Al-Qadi & al., 2012). La Figure 1.23 démontre que les éprouvettes provenant du compacteur LCPC sont plus représentatives, car elles subissent les contraintes dans le même sens qu'elles sont soumises lors du passage d'un véhicule (Doucet & Auger, 2010).

Le bitume du GBR augmente les composantes élastiques du comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux (Shu, Huang & Vukosavljevic, 2008). Des études sur des enrobés produits en laboratoire ont montré que l'ajout de faibles quantités de GBR (15-20 %) n'affecte pas de manière significative la rigidité et la résistance du mélange à différentes températures (McDaniel, Soleymani, Anderson & Turner, 2002, McDaniel, Soleymani, & Slah, 2002, Haji, Sebaaly & Slah, 2002,). Cependant, l'augmentation de la teneur en GBR au-delà de 20 % améliore le module et la résistance aux déformations du mélange, ce qui se traduit par une résistance accrue à l'orniérage (Carter, Donovan, MacInnis & Strynadka, 2018). Pour des teneurs en GBR plus élevées ($> 40\%$), la rigidité du mélange augmente de manière significative à différentes températures lorsqu'aucun changement n'est apporté à la qualité du liant vierge (Boriack, 2014, Maupin, Diefenderfer & Gillespie, 2008). Il faut noter que les vides ont un impact majeur dans la rigidité d'un matériau bitumineux, c'est pourquoi une limite des vides entre les échantillons testés de $\pm 0,5\%$ doit être respectée (Al-Qadi & al., 2012; MTMD, 2023b).

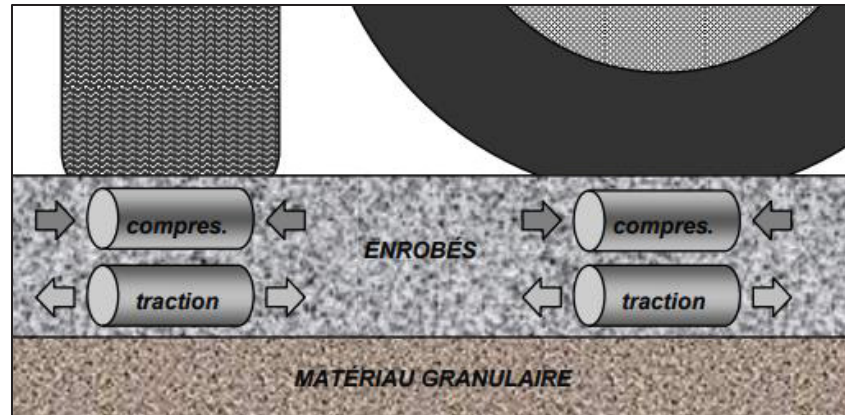


Figure 1.23 Sollicitation en traction et compression des enrobés lors du passage des véhicules
Tirée de Doucet & Auger (2010)

Le module complexe de l'enrobé (E^*) est déterminé à l'aide d'un essai qui implique l'application de sollicitations sinusoïdales en tension-compression à différentes fréquences sur le matériau. Ces mesures sont effectuées dans le domaine des petites déformations, où l'enrobé se comporte principalement comme un matériau viscoélastique linéaire (VEL). Dans ce contexte, la réponse à une sollicitation sinusoïdale est également sinusoïdale. E^* est défini comme le rapport entre l'amplitude complexe de la contrainte sinusoïdale appliquée au matériau et l'amplitude complexe de la déformation sinusoïdale résultante en régime établi. La relation est aussi possible lorsqu'une déformation est appliquée et la réponse de l'enrobé est mesurée (Di Benedetto & Corté, 2005). En vue d'une analyse détaillée, le module complexe peut être décomposé. La norme du module complexe ($|E^*|$) représente le rapport entre l'amplitude de la contrainte sinusoïdale (Équation (1.27)) et l'amplitude de la déformation sinusoïdale (Équation (1.26)), et son calcul s'effectue selon l'Équation (1.29). Un exemple de mesure est présenté à la Figure 1.24.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \quad (1.26)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \phi_E) \quad (1.27)$$

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\phi_E} = |E^*| e^{i\phi_E} \quad (1.28)$$

$$|E^*| = \sqrt{E_1 + iE_2} \quad (1.29)$$

Avec :

E^*	Module complexe, en MPa;
$ E^* $	Norme du module complexe, en MPa;
σ_0	Amplitude de contrainte, en MPa;
ε_0	Amplitude de déformation, en $\mu\text{m/m}$;
ω	Pulsation ($2\pi f$), en rad/s;
ϕ_E	angle de déphasage ($\phi_E = \omega * t_{\text{lag}}$), en $^\circ$;
i	Nombre complexe ($i^2 = -1$);
E_1	Composante élastique, en MPa;
E_2	Composante visqueuse, en MPa;
t_{lag}	temps de retard entre σ_0 et ε_0 ($t_{\text{lag}} = \phi_E / \omega$).

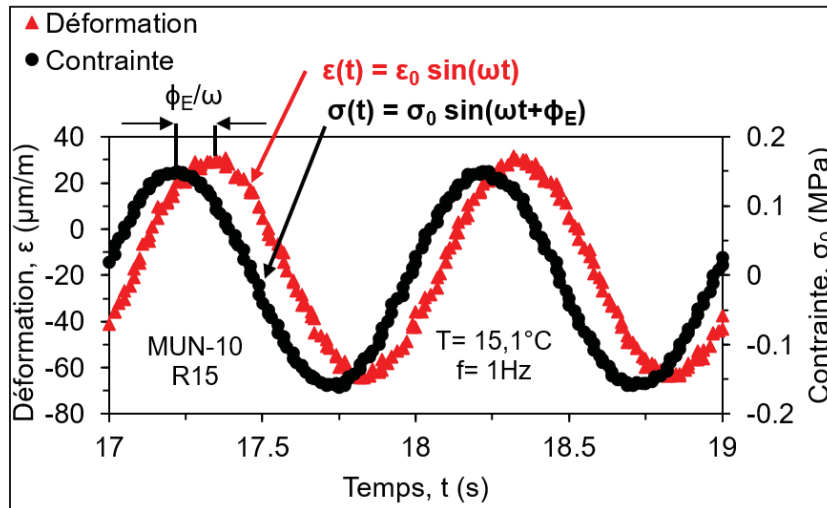


Figure 1.24 Variation de la contrainte et de la déformation lors d'un essai de module complexe à 1 Hz et 15,1°C
Enrobé à 15% de GBR

1.5.3.1 Représentation graphique des résultats

Deux représentations graphiques essentielles, la courbe isotherme et la courbe isochrone peuvent être utilisées pour analyser les propriétés des matériaux. Dans la courbe isotherme, on trace la norme du module complexe ($|E^*|$) en fonction des fréquences de sollicitation, mais à des températures d'essai variable, comme démontré dans la Figure 1.25. Cette représentation met en évidence l'évolution de la pente en fonction de la fréquence, permettant ainsi d'évaluer la susceptibilité cinétique du matériau bitumineux. En d'autres termes, elle aide à comprendre les variations du module face à différentes fréquences de sollicitation (Di Benedetto & Corté, 2005). Par contraste, la courbe isochrone est réalisée à une fréquence de sollicitation fixe, tout en variant les températures, ce qui la distingue de la courbe isotherme, tel que représenté à la Figure 1.26. Il est possible de remarquer qu'une même valeur de norme de module peut être obtenue à différents couples T° -fr. Ces représentations graphiques permettent de confirmer la validité de l'application du Principe de Superposition Temps-Température (PSTT) et l'utilisation des différents modèles rhéologiques qui sont démontrés aux sections suivantes.

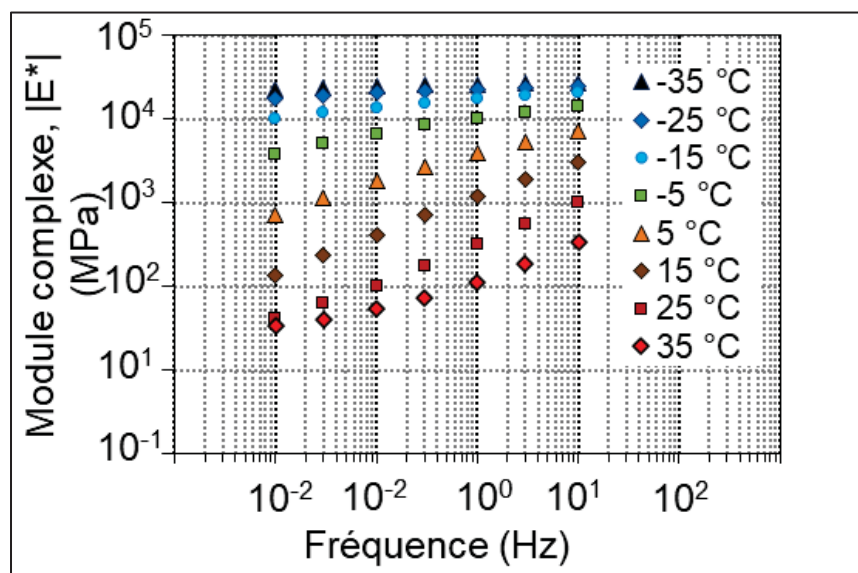


Figure 1.25 Exemple de courbe isotherme
Enrobé MUN-10 avec 15 % de GBR

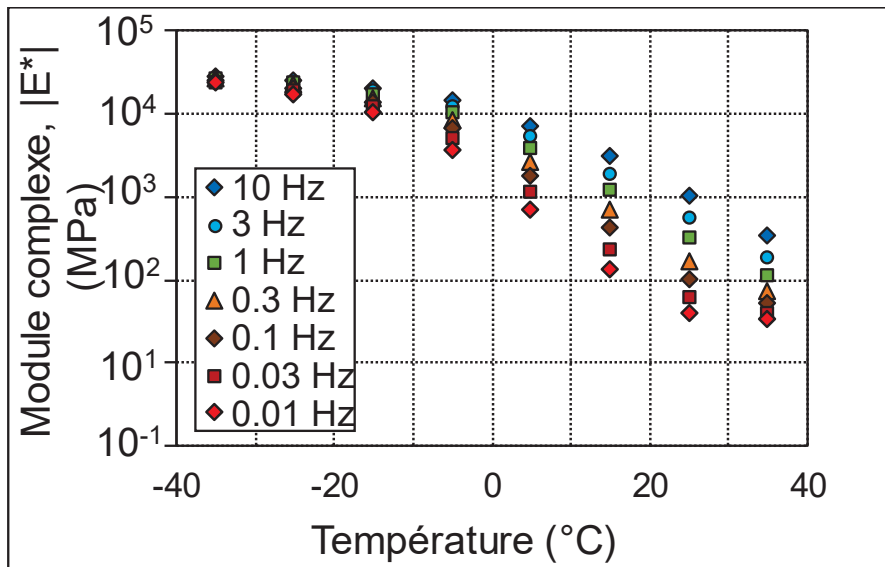


Figure 1.26 Exemple de courbe isochrone
Enrobé MUN-10 avec 15 % de GBR

Une seconde représentation graphique peut être réalisée en utilisant les points expérimentaux de l'angle de phase et du module dynamique, appelée espace de Black, comme présenté à la Figure 1.27. Cette représentation consiste à tracer le logarithme de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de l'angle de phase (ϕ) correspondant.

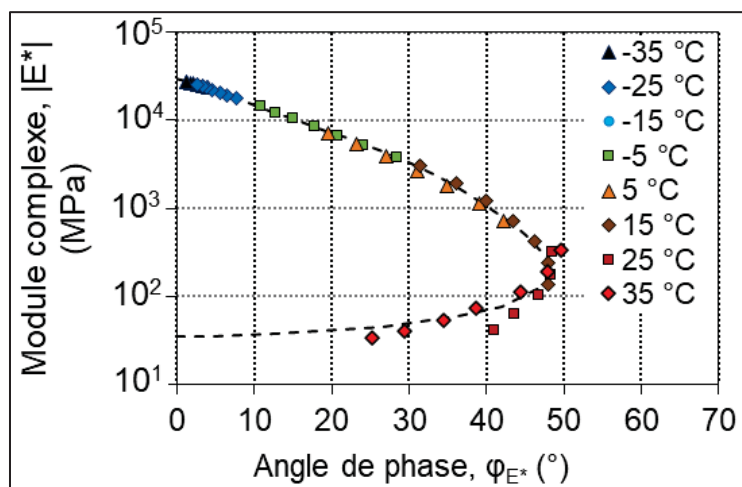


Figure 1.27 Exemple d'espace de Black
Enrobé MUN-10 avec 15% de GBR

Les résultats peuvent être aussi présentés avec le plan Cole-Cole (Figure 1.28). La représentation du plan Cole-Cole implique de placer la composante élastique du module complexe (E_1) sur l'axe des abscisses et la composante visqueuse (E_2) sur l'axe des ordonnées. La courbe ainsi obtenue est spécifique au matériau étudié et peut être exploitée pour ajuster un modèle de comportement rhéologique, présenté à la prochaine section.

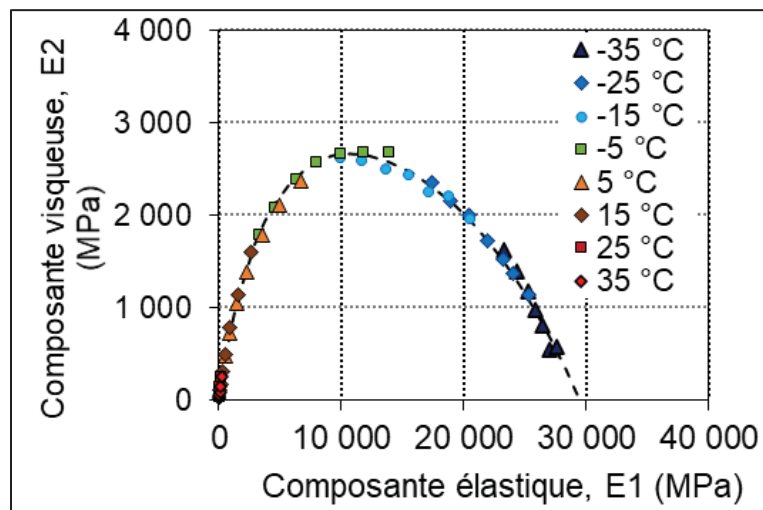


Figure 1.28 Exemple de plan Cole-Cole
Enrobé avec 15% de GBR

1.5.3.2 Principe d'équivalence temps-température (PETT)

Le Principe d'équivalence temps-température (PETT) est une approche fondamentale dans l'étude des matériaux bitumineux, permettant de prédire leur comportement sur une large gamme de températures et de fréquences de sollicitation. Ce principe est confirmé lorsque les données expérimentales génèrent une courbe unique dans les représentations de Cole-Cole et de Black, montrant ainsi une indépendance par rapport à la fréquence et à la température (Pokorski, Radziszewski & Sarnowski, 2015). En pratique, cela signifie que l'effet d'une augmentation de la fréquence de sollicitation est similaire à celui d'une baisse de température et inversement, une caractéristique des matériaux thermorhéologiquement simples (Di Benedetto & Corté, 2005) et l'Équation (1.30) peut donc s'appliquer :

$$E^*(fr_1, T_1^\circ) = E^*(fr_2, T_2^\circ) \quad (1.30)$$

Il est important de noter que l'utilisation de bitumes modifiés par des polymères ou ayant une haute teneur en paraffines peut déroger à ce principe, où les données expérimentales à des températures élevées s'écartent des courbes maîtresses, formant des boucles distinctes (Olard & al., 2005). Les courbes maîtresses sont créées en ajustant les courbes isothermes à une température de référence par le biais d'un facteur de translation " a_T ", présenté aux Équations (1.31) et (1.32). Ces ajustements aboutissent à une courbe unique qui fournit des estimations de module à des fréquences qui sont autrement inatteignables par des essais standards, comme indiqué à la Figure 1.29. Le module complexe, qui est une fonction de la température et de la fréquence de sollicitation ($E^* = E^*(T, f)$), peut être réduit à une fonction d'une seule variable grâce à l'utilisation du PTT. Ce principe permet d'établir une courbe maîtresse (courbes isochrones) pour une température de référence donnée, en effectuant des translations parallèles des isothermes le long de l'axe des fréquences. La relation de William, Landel et Ferry (WLF) est utilisée pour relier le facteur de translation à la température, avec les constantes C_1 et C_2 dépendant de la température de référence (William, Landel & Ferry, 1955; Di Benedetto et Corté, 2005).

$$E^*(fr, T^\circ) = E^*(a_T fr, T_{ref}^\circ) \quad (1.31)$$

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad (1.32)$$

Les constantes C_1 et C_2 sont spécifiques à une température de référence et peuvent être recalculées pour une autre température de référence en utilisant des relations mathématiques dérivées. Ces recalculs permettent de transposer les données pour correspondre à différentes conditions de service, ce qui est essentiel pour la conception et l'optimisation des enrobés bitumineux utilisés dans la construction de chaussées (Bilodeau, 2012). Pour tracer les courbes maîtresses, on multiplie la fréquence à laquelle l'essai a été effectué par a_T . La nouvelle

fréquence est utilisée en abscisse et on obtient une seule courbe unique, tel que présentée à la Figure 1.29.

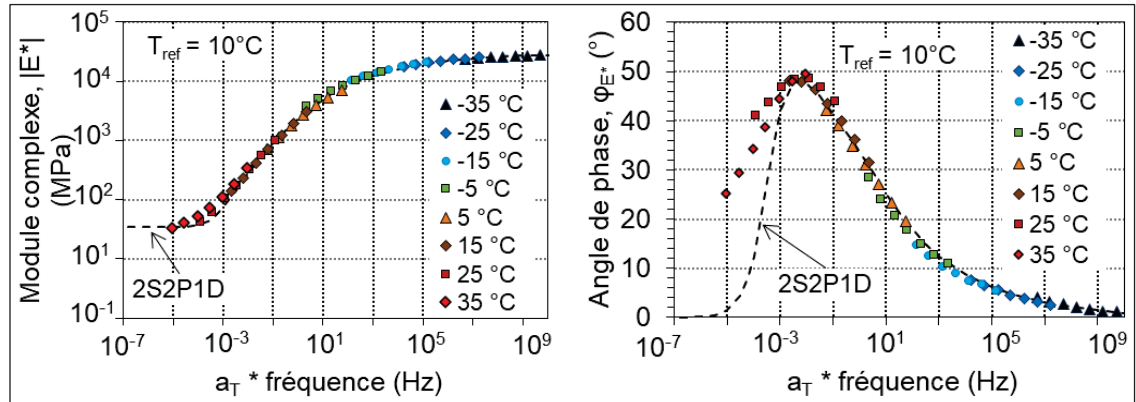


Figure 1.29 Courbes maître : a) Norme du module complexe $|E^*|$ et b) Angle de phase. Enrobé MUN-10 à 15 % de GBR

1.5.3.3 Modélisation du comportement viscoélastique des matériaux

Dans le domaine de la rhéologie des matériaux bitumineux, les modèles viscoélastiques linéaires (VEL) analogiques, tels que ceux de Maxwell et de Kelvin-Voigt, sont fondamentaux pour décrire le comportement des liants et enrobés bitumineux (Mangiafico, 2014). Ces modèles sont composés d'une série d'éléments rhéologiques simples (ressorts et d'amortisseurs linéaires) tel que présenté à la Figure 1.30.

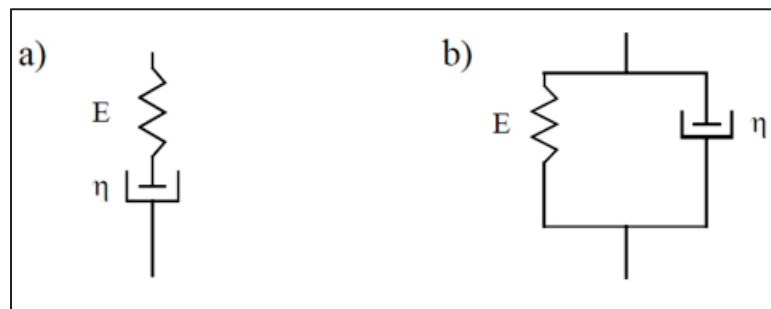


Figure 1.30 Élément de Maxwell (a) et de Kelvin-Voigt (b)
Tirée de Olard (2003)

Cependant, pour capturer la complexité réelle de ces matériaux, des modèles plus avancés avec un spectre continu, comme le modèle 2S2P1D, sont préférés (Lachance-Tremblay & al., 2020). Le modèle 2S2P1D, une extension du modèle Huet-Sayegh, intègre deux ressorts, deux éléments paraboliques et un amortisseur linéaire, offrant une meilleure représentation des matériaux à basses fréquences et hautes températures (Lamothe, Perraton & Di Benedetto, 2016).

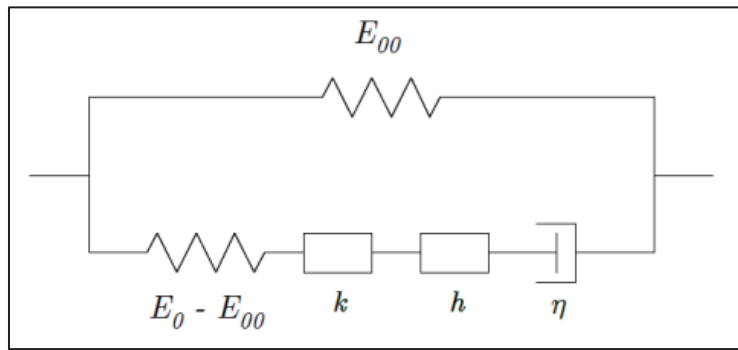


Figure 1.31 Représentation du modèle 2S2P1D
Tirée de Olard (2003)

Ce modèle, qui utilise sept constantes pour une température donnée, peut être ajustée via la fonction de WLF pour décrire l'évolution de ses paramètres, totalisant neuf paramètres de modélisation et est présenté à l'Équation (1.33) :

$$E_{2S2P1D}^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau_E)^{-k} + (j\omega\tau_E)^{-h} + (j\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (1.33)$$

Avec :

- h, k Exposants, tels que $0 < k < h < 1$;
- E_{00} Valeur du module statique, soit lorsque ω tend vers 0;
- E_0 Valeur du module vitreux, soit lorsque ω tend vers ∞ ;
- β, δ Constantes;
- τ_E Temps de relaxation qui dépend de la température comme exprimée dans l'Équation (1.34) :

$$\tau_E(T) = a_{TE}(T)\tau_{0E} \quad (1.34)$$

Il est particulièrement efficace pour analyser les liants, mastics et enrobés bitumineux, permettant des ajustements précis dans le plan Cole-Cole pour coïncider avec les données expérimentales (Singh, Showkat & Girimath, 2020; Di Benedetto, Delaporte & Sauzéat, 2007).

1.5.4 Rigidité par traction indirecte

Une autre méthode est proposée pour déterminer le module dynamique est à l'aide d'un essai de module par traction indirecte (ITSM), comme présenté à la Figure 1.32. L'essai se réalise sur une éprouvette cylindrique et consiste à appliquer une charge verticale diamétrale impulsive avec un temps de montée de 124 ms et viser une déformation horizontale de $5 \pm 2 \mu\text{m}$. L'Équation (1.35) permet de déterminer l'ITSM :

$$E = \frac{F(v + 0.27)}{z \cdot h} \quad (1.35)$$

Avec :

E	Module de rigidité, en MPa;
F	Charge appliquée le long du diamètre vertical d'un échantillon cylindrique, en N;
z	Déformation maximale enregistrée, en mm;
h	Épaisseur de l'éprouvette, en mm;
v	Coefficient de poisson à la température d'essai.

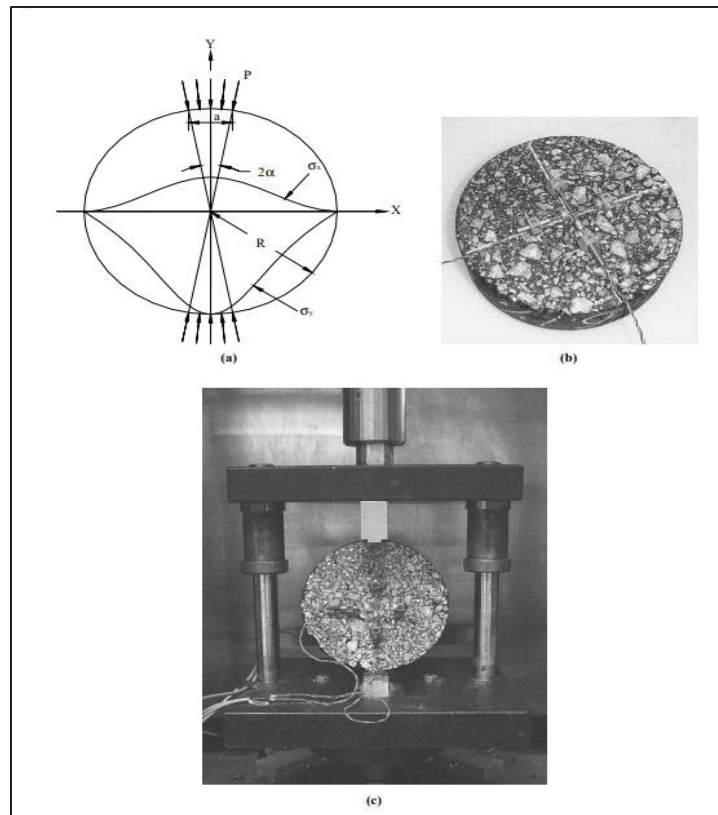


Figure 1.32 (a) Schéma de distribution des charges lors de l'essai de traction indirecte, (b) Installation des extensomètres sur l'éprouvette, (c) Essai de traction indirecte
Tirée de Kim & al. (2004)

La rigidité des enrobés augmente généralement avec la teneur en GBR (Mogawer & al., 2012, Huang & al., 2011, Huang & al., 2005, Ozer & al., 2009). Augmenter la température du GBR avant le malaxage augmente la rigidité du matériau dû à l'augmentation de la fusion entre le bitume du GBR et d'apport (Li & al., 2008). La rigidité du matériau avec GBR peut être réduite par l'utilisation d'un grade de bitume plus mou (Mogawer & al., 2012). Les données expérimentales d'une étude montrent que la source de GBR n'est pas un facteur significatif pour la rigidité à basse température, mais elle l'affecte considérablement à des températures plus élevées (Li & al., 2008). L'impact du GBR est beaucoup moins important lorsque des teneurs en dessous de 20 % sont utilisées (Ozer & al., 2009).

1.5.5 Fissuration

La fissuration transversale, ou fissuration thermique, est un mode de dégradation critique qui n'est pas lié au chargement de la chaussée (Carter, 2018). Elle prend normalement naissance à la surface de la chaussée et se propage par la suite vers le bas, sous l'action des contraintes thermiques (Ling & al., 2019). Lorsque la température baisse, des contraintes se créent par la contraction de l'enrobé. Plus la teneur en GBR est élevée, plus le bitume présente un comportement fragile à plus haute température (Ozer & al., 2009). La fissuration thermique est la principale cause de dégradation qui demande la réhabilitation des chaussées (Zaumanis & Valters, 2018). Les fissures transversales sont observées dans la direction perpendiculaire à l'axe de la route. Lorsqu'une fissure thermique se déclenche et se propage à partir de la surface de la chaussée, l'eau pénètre dans le système de chaussée, ce qui peut provoquer un décapage et la formation de lentilles de glace, détériore davantage la structure de la chaussée et réduit sa durée de vie (Vassaux, 2017). Les causes probables de la fissuration transversale sont principalement liées aux propriétés du bitume, qui s'est fragilisé lors du vieillissement ou un grade de PG non adéquat pour la zone climatique (kim, 2005).

Les contraintes thermiques se développent plus rapidement avec l'augmentation de GBR. Les enrobés avec fort taux de GBR ont donc une moins bonne résistance à la fissuration thermique qu'un enrobé vierge. Le changement du grade de bitume améliore les caractéristiques à 0°C, mais ne change pas significativement le comportement à -12 °C (Ozer & al., 2009). Des résultats d'essais de rupture indiquent que le mélange ne contenant aucun matériau recyclé a une énergie de fracture la plus élevée (Li & al., 2008; Huang, Shu & Vukosavljevic, 2011). L'utilisation d'un régénérant à bitume augmente la résistance à la fissuration thermique, car il a un diminue la température critique basse du combiné bitumineux (Tran, & al., 2012). L'ajout d'additifs tièdes augmente la résistance à la fissuration, mais semble se dégrader plus rapidement au cours des cycles de gel-dégel (Guo & al., 2014).

Il existe une multitude d'essais pour caractériser la résistance à la fissuration thermique des enrobés bitumineux qui simule ou non les conditions lors de sa durée de vie (Teltayev, 2014;

Pszczola & al., 2018). Un premier essai, nommé essai de fluage d'une poutre de flexion, consiste à reproduire la théorie de l'essai BBR pour les bitumes, mais sur une éprouvette prismatique d'enrobé bitumineux et d'effectuer un essai en flexion sur trois points, tel que présenté à la Figure 1.33.

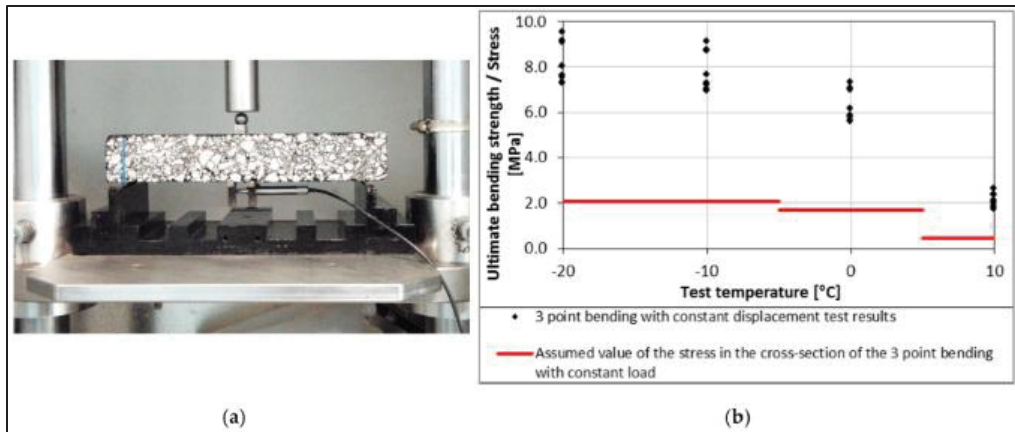


Figure 1.33 Essais en flexion sur trois points et charge constante
Tirée de Pszczola & al. (2018)

L'essai de retrait thermique empêché, ou TSRST (*Thermal Stress Restrained Specimen Test*), évalue la réaction des enrobés bitumineux face aux tensions induites par un refroidissement rapide, situation commune pour les chaussées en période de chute de température pouvant mener à des fissures (Aschenbrener, 1995). Une éprouvette d'enrobé compacté est placée dans un dispositif qui empêche la contraction de l'éprouvette lors du refroidissement, imposant ainsi une contrainte interne. La procédure consiste à refroidir l'échantillon sous contrainte physique, enregistrant la température critique où la fissuration se produit, révélant ainsi la résilience de l'enrobé face à la fissuration thermique (Basueny, Perraton, & Carter, 2014). L'éprouvette est refroidie à un taux contrôlé tout en étant physiquement restreint pour l'empêcher de se contracter, ce qui génère des contraintes internes. La température et la contrainte à laquelle l'échantillon se fissure sont enregistrées, ce qui indique sa résistance à la fissuration thermique.

La Figure 1.34 montre un exemple de développement des contraintes lors de la baisse de la température. La température de transition (*transition temperature*) désigne le point où le

matériau passe d'un comportement ductile à un comportement plus fragile, une transformation souvent signalée par un changement notable de la pente sur la courbe contrainte-température. Ce point est souvent caractérisé par un changement dans la pente de la courbe contrainte-température. La température croisée (*cross temperature*) est identifiée là où un second changement significatif dans la pente de la courbe est observé. Ce point marque une température spécifique où l'on constate une modification additionnelle dans la réaction du matériau, ce qui peut indiquer le début d'une nouvelle phase de comportement du matériau face aux contraintes thermiques.

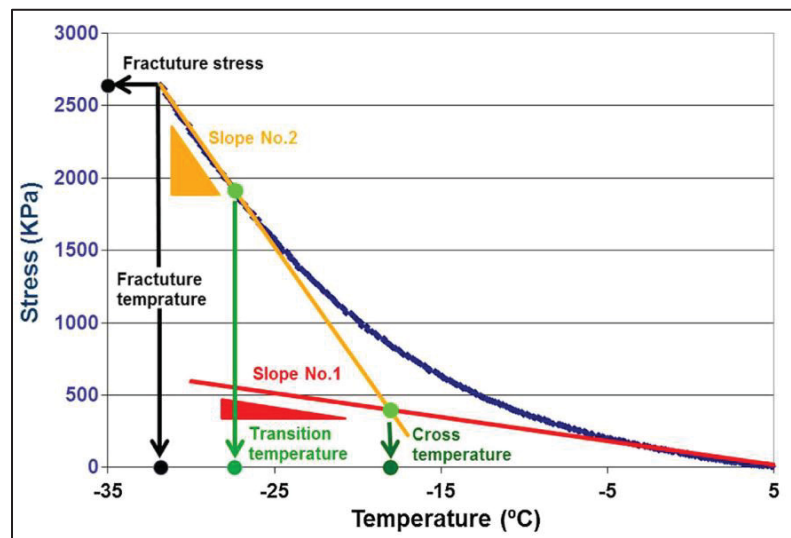


Figure 1.34 Évolution des contraintes lors de l'essai TSRST
Tirée de Basuony & al. (2014)

La fissuration longitudinale est la fissure à la surface de la chaussée qui est généralement parallèle à l'axe de la route, située ou non dans les traces de roues. Les fissures longitudinales dans les traces de roue sont directement liées au trafic et sont souvent un indicateur de fatigue dans l'enrobé (Taniguchi & al., 2008). Les fissures longitudinales non situées dans les traces de roue peuvent être liées au trafic, mais sont habituellement dues à un joint de construction mal exécuté ou d'une ségrégation dans l'enrobé (Carter, 2018). Les fissures longitudinales au bord de la rive, nommées fissures de rive, peuvent être un signe d'un apport d'eau ou d'un assèchement du support de la chaussée et cause des contraintes à l'enrobé.

Plusieurs techniques permettent d'évaluer les caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux, surtout leur résistance aux fissures et leur capacité à supporter des charges (Nsengiyumva, 2015; Ozer & al., 2009). Selon le type de test effectué, la forme des échantillons varie : pour l'essai de poutre entaillée à bord unique (SEB), on utilise une poutre entaillée ; pour l'essai de traction compacte en forme de disque (DCT), un disque ; et pour l'essai de flexion semi-circulaire (SCB), un échantillon en forme de demi-lune. Comme illustré dans la Figure 1.35, une entaille est pratiquée sur les échantillons pour diriger et faciliter la croissance des fissures à partir de cette zone prédéfinie.

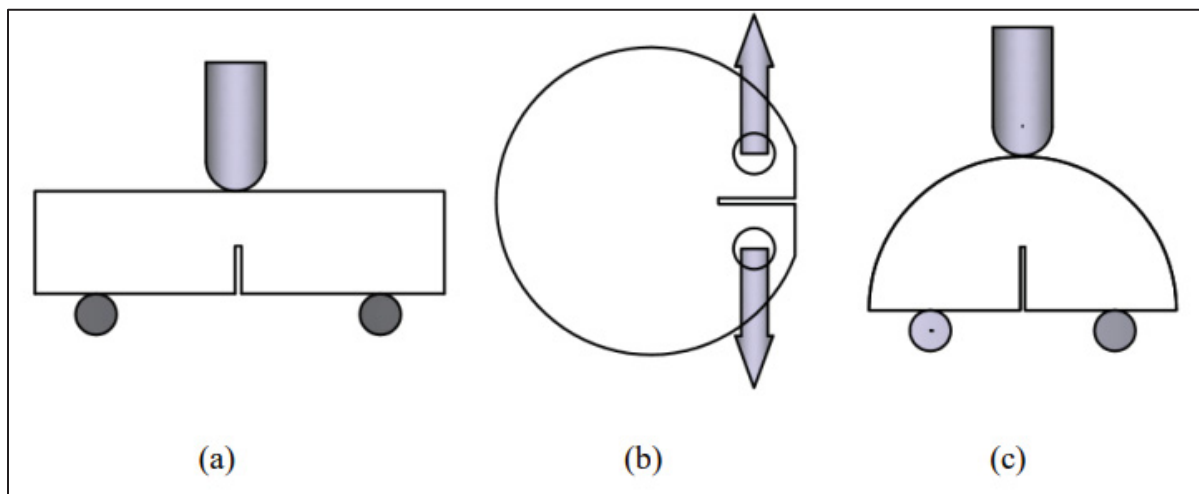


Figure 1.35 Essais pour déterminer la propagation de fissures : a) essai de poutre entaillée à bord unique (SEB), (b) essai de traction compacte en forme de disque (DCT), et (c) essai de flexion semi-circulaire (SCB).

Tirée de Nsengiyumva (2015)

L'essai de traction indirecte, ou IDT (*Indirect Tensile Test*), mesure la résistance à la traction, ce qui donne des indications sur la capacité du matériau à résister aux déformations et aux fissurations (Shu & Vukosavljevic, 2011). Un échantillon cylindrique est chargé diamétralement à une vitesse constante dans une machine d'essai jusqu'à la rupture. La charge est appliquée perpendiculairement à l'axe vertical de l'échantillon et la force maximale avant la rupture est mesurée et utilisée pour calculer la résistance à la traction de l'enrobé. L'essai est généralement réalisé à des températures intermédiaires (-10 à 20 °C).

À partir des résultats IDT, il est possible de déterminer l'indice de tolérance à la fissuration, ou CTindex (*Crack Tolerance Index*), est un essai qui permet d'évaluer la tolérance d'un enrobé à la formation de fissures en prenant en compte à la fois la résistance et la capacité de déformation avant la fissuration (Li & Marasteanu, 2010). Il combine la résistance à la traction et la déformation à la rupture. CTindex est calculé à partir de la relation entre l'énergie de déformation et la contrainte maximale supportée par l'échantillon. Un CTindex élevé indique une bonne tolérance aux fissurations, ce qui suggère que l'enrobé a une meilleure performance en service et une durée de vie plus longue (Huang, Shu & Vukosavljevic, 2011).

La fissuration par fatigue, également connue sous le nom de fissuration "alligator" ou "crocodile", est l'une des formes les plus courantes de détérioration des revêtements bitumineux au fil du temps (Moghaddam & al., 2011). Le revêtement présente des fissures qui s'étendent sur des surfaces plus ou moins grandes, créant un motif de fissuration sous forme de mailles polygonales dont la taille moyenne est d'environ 300 mm ou moins. Ces fissures se composent d'au moins trois cases dans toutes les directions. On peut distinguer les fissures de carrelage des fissures linéaires ramifiées en mailles. La fissure de carrelage ne ressemble ni à une fissure longitudinale ni transversale ramifiée et ne contient pas de fissure principale.

1.5.6 Fatigue

Les enrobés bitumineux sont soumis à des sollicitations de courte durée à chaque passage de véhicule. La répétition de ces charges peut entraîner la fissuration par fatigue (Di Benedetto & Corté, 2005). Les essais de fatigue en laboratoire permettent de déterminer la déformation ε_6 qui provoque la rupture de l'enrobé après 10^6 cycles, sous des conditions d'essai spécifiques (température et fréquence). La rupture est définie comme le nombre de cycles où l'enrobé subit une réduction de moitié de son module initial (50 % de E^* initial) à différents niveaux de sollicitations. La Figure 1.36 présente les différents types d'essais de fatigue en fonction des diverses géométries d'éprouvettes.

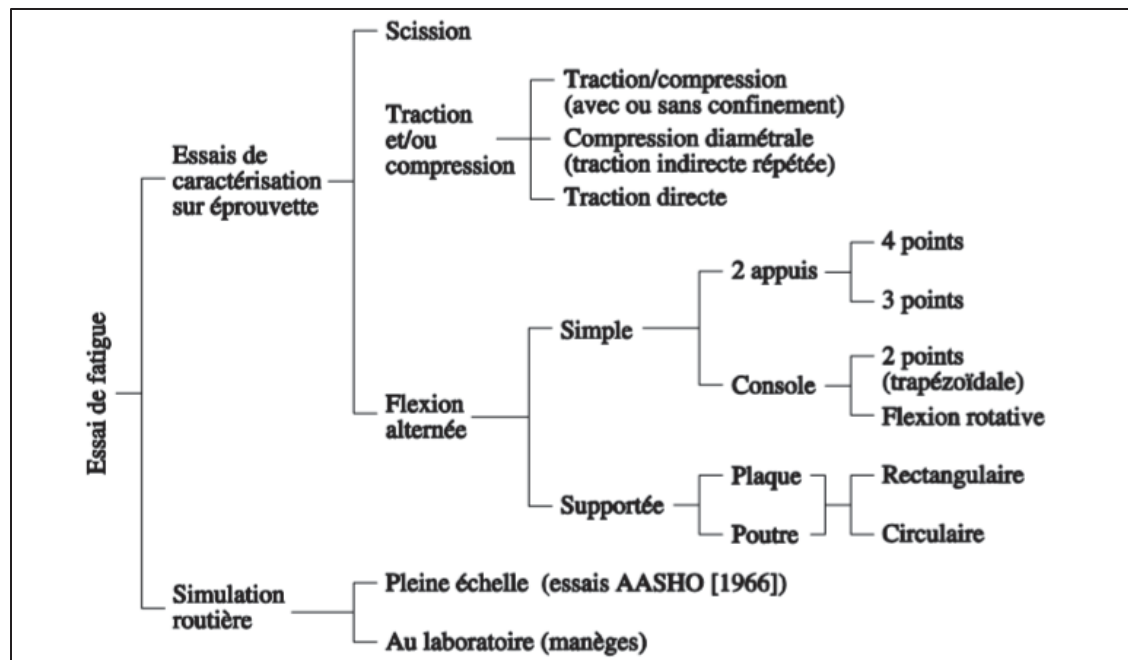


Figure 1.36 Types d'essais de fatigue sur les enrobés bitumineux
Tirée de Di Benedetto & Corté (2005)

La nature et la teneur en liant ont un impact significatif sur la performance en fatigue de l'enrobé bitumineux. La résistance à la fatigue augmente avec la teneur en bitume jusqu'à atteindre un niveau optimal, autour de 7 %, après quoi elle commence à diminuer (Epps & al., 1969). Par ailleurs, la résistance à la fatigue s'améliore avec la rigidité du bitume, ce qui peut être observé à travers la pente de la courbe de fatigue ou courbe de Wöhler (Di Benedetto & Corté, 2005). L'utilisation de bitumes modifiés avec des polymères, tels que le styrène-butadiène, renforce également la résistance en fatigue de l'enrobé bitumineux (Modarres & Hamed, 2014).

D'après les critères de base, les enrobés contenant du GBR semblent avoir une meilleure résistance à la fissuration par fatigue (Huang & al., 2011; Al-Qadi & al., 2012). Le critère de réduction de 50 % du module suggère que l'ajout de GBR dans l'enrobé prolonge sa durée de vie en fatigue. En revanche, le critère du plateau du ratio de changement d'énergie dissipée (RDEC) lors de l'essai de fatigue paraît plus pertinent pour les enrobés à fort taux de recyclé (Shu, Huang & Vukosavljevic, 2008). La Figure 1.37 illustre un exemple typique des variations

du module et du RDEC dans les trois zones de comportement d'un enrobé soumis à un essai de fatigue.

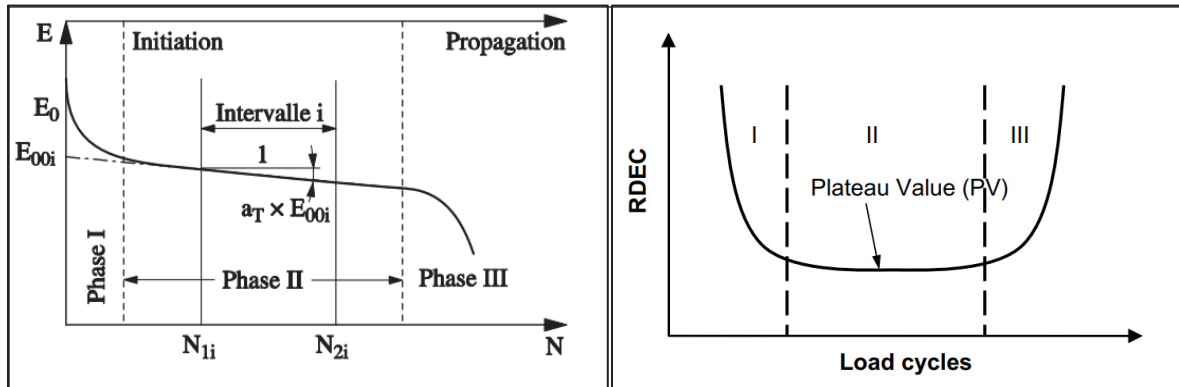


Figure 1.37 Résultats typiques de la variation de module complexe pendant un essai de fatigue (Gauche) - Ratio de changement d'énergie dissipé RDEC en fonction du nombre de cycles appliqués (Droite)

Tirée de Shu, Huang & Vukosavljevic (2008)

Le remplacement du bitume neuf par le bitume vieilli provenant du GBR a un impact négatif sur le comportement à la fatigue de l'enrobé (Norouzi, Sabouri & Kim, 2014; Mangiafico & al., 2015). En effet, le module du bitume vieilli diminue la durée de vie de l'enrobé, car il perd son adhésivité, essentielle à la cicatrisation des microfissures (Di Benedetto & Corté, 2005). L'ajout d'additifs régénérants permet de rajeunir le bitume du GBR, améliorant ainsi la résistance à la fatigue (Molenaar & Mohajeri, 2014). Par conséquent, l'utilisation d'un bitume de grade plus souple augmente la résistance à la fatigue des enrobés contenant un pourcentage élevé de GBR (Li & al., 2008).

1.6 Méthode de formulation des enrobés bitumineux avec granulats bitumineux recyclés

Au Québec, la méthode de formulation est basée sur la méthode superPAVE (MTQ, 2019) et elle offre trois niveaux selon son utilisation et la sévérité du trafic (Perraton, 2013). Le premier niveau consiste à sélectionner un type d'enrobé et les matériaux. La granulométrie et la teneur en bitume sont basées sur une valeur de V_{be} visé selon le type d'enrobé. Le grade de bitume

est choisi en fonction de la zone géographique et de la sévérité du trafic. Le deuxième niveau ajoute des essais de compactabilité à la PCG et de sensibilité à l'eau. Les vides obtenus à la PCG doivent être assez élevés au début et à la fin de l'essai, soit à 10 et 200 girations. Pour le N_{design} , entre 80 et 120 girations selon le type d'enrobé, les vides doivent se situer entre 4 et 7 %. La sensibilité à l'eau vise à déterminer la perte de résistance d'un enrobé qui a été saturé en eau pour une période donnée. Le troisième niveau ajoute un essai de résistance à l'orniérage. Aucune adaptation ou d'essais de performances supplémentaires n'est requise lorsque les enrobés présentent des GBR. La teneur maximale en GBR acceptée par les agences au Québec est 20%.

Au Canada, la méthode de formulation est différente pour chaque province. Cependant, elle demeure similaire entre les enrobés avec GBR et celle d'un enrobé sans recyclés. La seule différence est par rapport au grade de bitume d'apport. Il est recommandé de modifier le bitume d'apport selon la teneur et les caractéristiques à température basse du bitume extrait du GBR et est présenté au Tableau 1.10 (Carter & al., 2018). Le grade de bitume d'abord sélectionné selon la zone climatique, le type de route et le débit de circulation. Ensuite, on modifie le bitume d'apport selon le taux et les caractéristiques du bitume du GBR.

Tableau 1.10 Sélection du grade de bitume en fonction de
la teneur et les caractéristiques du GBR
Adapté de Carter & al. (2018)

	Teneur en GBR		
	Température basse de caractérisation du bitume extrait des GBR*		
Recommandation de modification du bitume d'apport	PG Te n-22 ou plus bas	PG Te n-16	PG Te n-10 ou plus haut
Aucun changement	< 20 %	< 15 %	< 10 %
Utilisation d'un grade de bitume plus mou	20 – 30 %	15 – 25 %	10 – 15 %
Utilisation d'une charte de mélange	> 30 %	> 25 %	> 15 %
*Résultat obtenu à l'essai de fluage par flexion sur éprouvette de bitume (BBR)			

Par exemple, pour la reconstruction d'une route nationale à fort débit de circulation à Laval (zone 1), aucun changement du grade de bitume d'apport n'est recommandé pour un GBR dont la température basse du bitume extrait est -22°C jusqu'à une teneur à 20 %. Un bitume d'apport de grade de performance PG 64E-28 est donc sélectionné. Entre 20 et 30 %, on doit utiliser un grade de bitume plus mou, soit un grade de performance PG 64E-34. Au-dessus d'une teneur de 30 % de GBR, on recommande d'utiliser la charte de mélange.

La charte de mélange a été développée en assumant que la relation entre le bitume d'apport et le bitume issu du GBR est linéaire (Carter & al., 2018). La Figure 1.38 présente les résultats de hautes et basses températures d'un bitume d'apport PG 52S-34 et un bitume extrait d'un GBR. À une teneur en GBR de 40 %, la combinaison bitumineuse équivaut à un grade de performance PG 64n-28. La charte de mélange peut être utilisée pour déterminer d'autres caractéristiques du combiné bitumineux, telles que la viscosité et la rigidité (Singh & al., 2019).

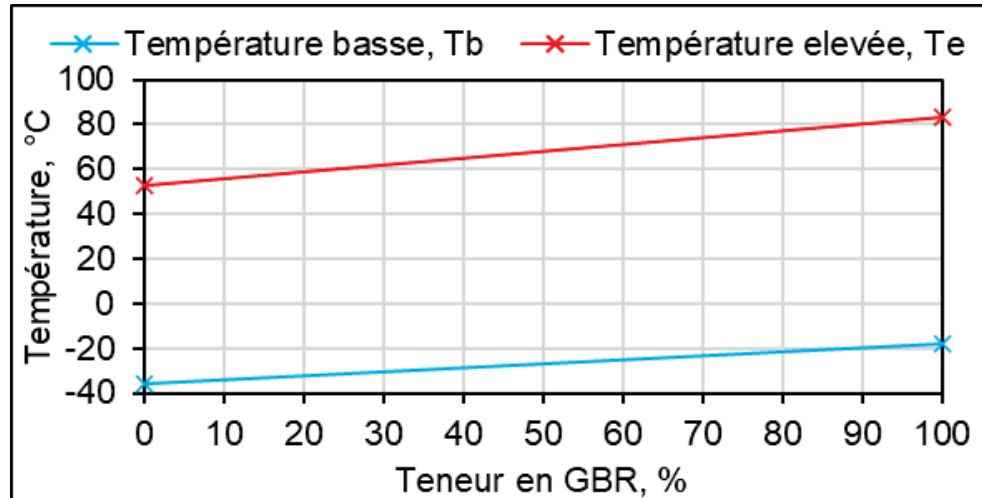


Figure 1.38 Exemple de résultats de charte de mélange de bitume d'apport et de bitume extrait du GBR

Cette méthode tient pour compte que 100 % de bitume du GBR fusionne avec le bitume d'apport. Cependant, la plupart des auteurs sont d'accord pour dire que ce n'est pas le cas (Lo Presti & al., 2019; Ozer & al., 2009; Huang & al., 2005). Certains auteurs s'intéressent plutôt au ratio de bitume recyclé (RBR) que la teneur en GBR, tel que présenté à l'Équation (1.36)

(Kaseer, Arámbula-Mercado & Martin, 2019; Abdelaziz & al., 2021; Pinheiro, Vasconcelos & Bernucci, 2022):

$$RBR = \frac{P_{bi,GBR}}{P_{bi,total}} * 100 \quad (1.36)$$

Avec :

RBR	Rapport de bitume recyclé par rapport à la masse totale de bitume exprimé en pourcentage;
$P_{bi, GBR}$	Masse du bitume issu des GBR exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé
$P_{bi, total}$	Masse de bitume totale exprimée en pourcentage de la masse de l'enrobé.

Il est accepté par l'industrie que l'utilisation de moins de 10 % de GBR par rapport à la masse totale des granulats dans les enrobés à un impact très limité au niveau des propriétés mécaniques (Moneron & Measson, 2004; Li & al., 2008). Par contre, lorsqu'entre 10 et 20 % de GBR sont ajoutés dans les enrobés, l'influence du bitume vieilli des GBR augmente et peut amener l'enrobé à devenir plus fragile (Pedraza, 2018). C'est pourquoi il est demandé d'utiliser un grade de bitume d'apport plus mou afin de contrer cette fragilisation. À des taux de GBR plus élevés, il est conseillé de bien caractériser les GBR et d'ajuster le bitume d'apport selon la rigidité du bitume des GBR (McDaniel & al., 2001). Aux États-Unis, la formulation d'enrobé contenant des GBR est effectuée en suivant le rapport de la *Federal Highway Administration's RAP Expert Task Force* qui mentionne que 100 % du bitume des GBR peut être considéré comme utilisable, comme mobilisable dans le nouvel enrobé (Bukowski, 1997).

1.7 Sommaire de la revue de littérature

La revue de littérature aborde de manière exhaustive le rôle et la composition des enrobés bitumineux, mettant un accent particulier sur les GBR. Il débute avec l'importance des enrobés dans la construction routière et leur impact sur la durabilité des chaussées. Une analyse

détaillée des composants des enrobés, y compris les granulats et le bitume, est fournie, soulignant les variétés de granulats et la complexité chimique du bitume.

La revue discute des modifications du bitume pour améliorer ses propriétés, et de l'influence du vieillissement sur sa performance. Elle examine aussi le comportement des bitumes et leur caractérisation, en tenant compte des propriétés physiques, rhéologiques et chimiques. Le comportement thermosensible du bitume et son impact sur les enrobés bitumineux sont également traités, en lien avec la température et les sollicitations mécaniques.

Un autre point crucial est l'intégration des GBR dans les enrobés bitumineux. La revue explore la caractérisation des GBR, les techniques de malaxage en laboratoire et les ajustements nécessaires pour l'ajout d'une forte teneur en GBR. Elle évalue l'impact des GBR sur différentes propriétés mécaniques de l'enrobé, telles que la rigidité, la résistance à la fissuration et à l'orniérage, ainsi que la susceptibilité au vieillissement.

Des méthodes d'évaluation des performances des enrobés bitumineux sont présentées, notamment des essais pour mesurer la résistance à la fissuration et à la déformation permanente. La revue met en lumière le PETT et son application dans la modélisation du comportement viscoélastique des matériaux.

Enfin, la revue aborde les méthodes de formulation des enrobés bitumineux avec GBR, s'attardant sur les recommandations pour le choix du bitume d'apport et l'utilisation de la charte de mélange. Elle démontre une disparité parmi les méthodes proposées. Elle conclut sur l'importance de la caractérisation précise des GBR pour optimiser la formulation des enrobés bitumineux et leur performance en service.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

2.1 Objectifs de la recherche

Les défis sur l'incorporation d'une forte teneur en GBR dans les nouveaux enrobés ont été mis en lumière à travers la littérature. Le bitume vieilli, les méthodes de malaxages variées et la caractérisation limitée des GBR sont les principales sources qui limitent leur utilisation dans les nouveaux enrobés.

L'objectif principal de cette thèse est donc de forger une avancée significative dans le développement de matériaux et d'évaluer le comportement des enrobés contenant un fort pourcentage de GBR. Pour réaliser ces objectifs, le programme de recherche s'articule autour de trois axes principaux :

- Volet 1 : Une exploration détaillée des propriétés des GBR.
- Volet 2 : Une investigation approfondie de l'effet du processus de malaxage sur les enrobés incorporant des GBR en environnement contrôlé de laboratoire.
- Volet 3 : Une évaluation rigoureuse de la performance des enrobés à divers niveaux d'intégration de GBR.

La Figure 2.1 présente l'organigramme général de la recherche. Les volets 1 et 2 ont pu être réalisés simultanément et étaient requis pour débiter le volet 3.

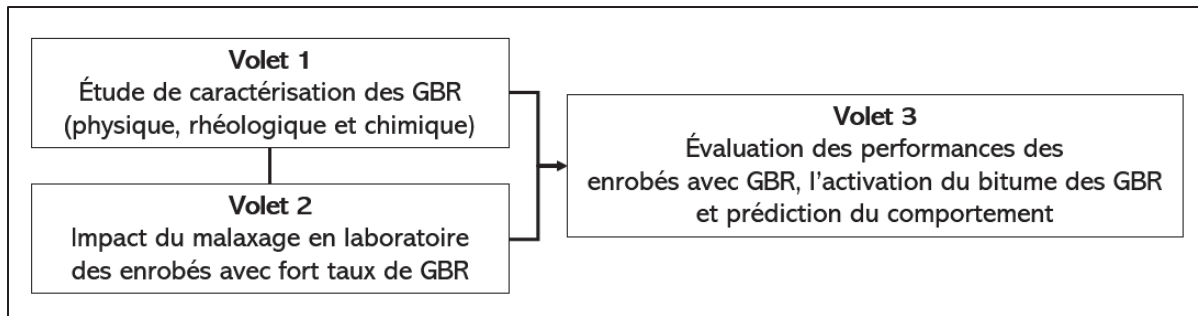


Figure 2.1 Organigramme du programme de recherche

L'objectif principal du premier volet de l'étude est d'effectuer une caractérisation approfondie des GBR en se concentrant sur l'analyse des variations de leurs propriétés pour une même zone climatique. Cette phase inclut le développement d'une méthode de caractérisation qui englobe non seulement les GBR, mais aussi les granulats qui les constituent et le bitume extrait. Un objectif secondaire est d'explorer la possibilité de détecter la présence de polymères dans le bitume des GBR. Enfin, l'étude cherche à identifier les propriétés clés des GBR qui devraient être intégrées dans les méthodes actuelles de formulation des enrobés bitumineux.

Le deuxième volet de cette thèse vise à déterminer comment le type et la durée de malaxage affectent les performances et les propriétés des enrobés composés de 30 % de GBR. Cette phase se concentre sur des expérimentations en laboratoire pour ajuster les méthodes de malaxage existantes et pour mettre en évidence l'influence des GBR sur ces ajustements.

Le dernier volet se concentre sur l'impact du ratio de bitume recyclé (RBR) sur les performances et les propriétés des enrobés, intégrant des taux de GBR variant de 0 à 100 %. Cette phase prend également en compte deux niveaux de mobilisation du bitume. De plus, l'étude vise à développer une méthode pour évaluer les performances des enrobés contenant des GBR sans nécessiter l'extraction par solvants, favorisant ainsi une approche plus sûre et écologique. Enfin, la charte de mélange, traditionnellement utilisée pour les propriétés des bitumes, est comparée sur les performances des enrobés pour évaluer la possibilité de l'intégrer comme outils de prédiction du comportement des enrobés.

2.2 Matériaux à l'étude

Pour le premier volet de cette étude, nous avons prélevé six échantillons de granulats bitumineux recyclés (GBR) de dimension 0-10 mm et deux échantillons de dimension 0-20 mm provenant de différentes carrières du Groupe Bauval. Toutes ces carrières sont localisées dans la zone métropolitaine, ce qui leur confère un climat uniforme. Les détails des GBR et leurs caractéristiques sont détaillés au CHAPITRE 3. Le choix de ces GBR repose sur l'hypothèse que, du fait de leur localisation dans une même zone climatique, ils devraient présenter des propriétés semblables.

Pour réaliser une comparaison détaillée, deux types de bitume ont été sélectionnés : le PG 52S-34 et le PG 64E-28. Le PG 52S-34 est un bitume non modifié ayant des performances supérieures à basse température, tandis que le PG 64E-28 est un bitume modifié qui offre une meilleure résistance à la déformation permanente sous haute température. Les caractéristiques de classification PG de ces bitumes sont présentées dans le Tableau 2.1 et les détails sont présentés dans le CHAPITRE 3. Les fiches descriptives des bitumes sont disponibles dans l'Annexe IV. Pour le volet 2 et 3, seulement le PG 52S-34 a été utilisé pour contrebalancer les performances des GBR à basse température et éliminer l'effet des polymères sur le comportement des enrobés.

Tableau 2.1 Bitumes à l'étude

Grade PG	Température élevée (T_e), °C	Niveau de sollicitation, n (essai MSCR)			Température basse (T_b), °C
		Jnr _{3,2} (kPa ⁻¹)	R _{3,2} (%)	Jnr _{diff.} (%)	
PG 52S-34	52,7	3,18	0	9.3	-34,9
PG 64E-28	75.2	0,11	89,4	74,6	-31.2

Pour les volets 2 et 3 de la recherche, une source unique de GBR 0-10 mm a été utilisée. Les caractéristiques de ce GBR, établies lors du premier volet, sont résumées dans le Tableau 4.2, le Tableau 4.3 et le Tableau 5.2. Les granulats employés pour l'ensemble de l'étude proviennent de la carrière Saint-Hippolyte, dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 2.2 et

les fiches techniques sont disponibles à l'Annexe V. La sélection de ces granulats s'est basée sur leurs caractéristiques intrinsèques idéales pour la fabrication de matériaux routiers. Ces granulats sont représentatifs de l'industrie et sont actuellement utilisés pour la fabrication d'enrobé bitumineux au Québec.

Tableau 2.2 Granulats à l'étude

Caractéristique		Sable manufacturé (0-2,5)	Criblure (0-5)	Pierre concassée (2,5-5)	Pierre concassée (5-10)
Granulométrie (%)	14	100	100	100	100
	10	100	100	100	93
	5	100	96	89	14
	2,5	86	66	20	3
	1,25	59	48	7	2
	0,630	40	34	3	---
	0,315	25	26	2	---
	0,160	12	18	1	---
	0,080	3,9	11,7	0,9	1,2
Absorption (%)		0,22	0,34	0,54	0,51
Densité brute		2,738	2,724	2,710	2,719
Catégorie		1	1	1	1a

Dans le cadre du volet 2, tous les granulats ont été tamisés et recombines pour maintenir un contrôle précis de la granulométrie. Pour le troisième volet, les granulats échantillonnés (méthode LC 21-01) ont été recombines via quartage, en appliquant une méthode de séparation mécanique (méthode LC 21-015). Pour chacun des volets, une description détaillée de la méthodologie sera abordée dans la section suivante.

2.3 Méthodologie expérimentale

2.3.1 Volet 1 : Caractérisation des granulats bitumineux récupérés

L'objectif principal du premier volet de l'étude est la caractérisation approfondie des GBR. Ce volet se concentre sur l'analyse des variations des propriétés des GBR issus d'une zone climatique. L'accent est mis sur l'élaboration d'une méthode complète de caractérisation,

couvrant non seulement les GBR eux-mêmes, mais également les granulats qui les composent et le bitume extrait de ces GBR. Un autre objectif de ce volet est la possibilité d'identifier la présence éventuelle de polymères dans les bitumes des GBR. Enfin, cette phase de l'étude vise à identifier et mettre en lumière les propriétés essentielles des GBR qui devraient être prises en compte dans les méthodes actuelles de formulation des enrobés bitumineux.

Le Tableau 2.3 présente les douze essais du Volet 1. Trois phases distinctes sont spécifiées, soit les essais sur le GBR, sur les granulats des GBR (issus de l'ignition) et les essais sur le bitume extrait des GBR à l'aide de trichloréthylène (TCE). Une schématisation de l'organigramme des essais est présentée à la Section 3.3.

Tableau 2.3 Liste des essais du volet 1

Essai	Caractéristique évaluée	Paramètres essai	Méthode	Matériau
Densité maximale	d _{mm}	25 °C	LC 26-045	GBR
Granulométrie	---	---	LC 21-040	
Teneur en bitume	p _{b, GBR}	450 °C	LC 26-006	
Granulométrie	---	---	LC 26-007	Granulats*
Densité brute	d _{gb}	25 °C	LC 21-065 LC 21-067	
Pénétration	PEN	100 g, 25 °C, 5 s	ASTM D5	Bitume**
Viscosité	η	135 et 165 °C	AASTHO T316 LC 25-007	
Rhéomètre à cisaillement dynamique	T _e	1,59 Hz	AASTHO T315	
Récupération des contraintes de fluage multiples	J _{nr 3.2} , J _{nr diff} , et R _{3.2}	64 °C	AASTHO T350	
Rhéomètre à flexion de poutre	T _b	-12 et -18 °C	AASTHO T313	
Module complexe en cisaillement	G* et φ	0.1 à 10 Hz -30 à 82 °C	Méthode maison	
Spectrométrie infrarouge à transformation de Fourier	Absorbance		Méthode maison	
*Issu de l'ignition à 450°C				
**Issu de l'extraction au TCE				

Lors de première phase, la densité maximale (d_{mm}) des échantillons de GBR est mesurée à l'aide de la méthode par pesée hydrostatique, telle que présentée à la Figure 2.2. Les échantillons ont été soumis à une pression inférieure à 4 kPa pendant une durée de 10 minutes. L'agitation a commencé après la première minute de pressurisation. La température de l'eau est maintenue à $25 \pm 0,5$ °C pendant le processus.



Figure 2.2 Essais de densité maximale

Ensuite, la distribution granulométrique des échantillons de granulats bitumineux recyclés (GBR) a été caractérisée. Cette répartition est représentée par ce que l'on nomme la 'courbe noire' pour les granulats enrobés. La Figure 2.3 illustre les tamiseurs Gilson et RO-TAP dans cette évaluation, où un tamisage de trois minutes a été appliqué pour les granulats grossiers (particules supérieures à 5 mm) et de dix minutes pour les granulats fins (particules inférieures à 5 mm).



Figure 2.3 Appareils de tamisage :
 a) Tamisage des gros granulats (Gilson);
 et b) Tamisage granulats fins (Ro-Tap)

La teneur en bitume ($p_{b, GBR}$) a été évaluée avec un four à ignition, tel que présenté à la Figure 2.4. Le four a été préchauffé et stabilisé à la température d'essai de 450 °C durant deux heures avant de commencer les essais. Les échantillons ont ensuite été placés dans le four et y sont restés jusqu'à ce que le poids indiqué par la balance intégrée ne fluctue plus pendant cinq minutes. La masse finale des échantillons a été enregistrée 25 minutes après leur retrait du four.

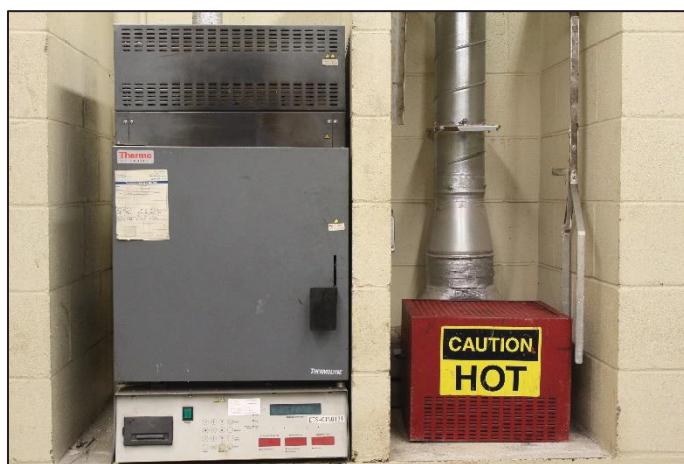


Figure 2.4 Four à ignition

La deuxième phase, portant sur les granulats des GBR issus de l'ignition, se limitait sur la granulométrie et la densité brute des granulats. Les appareils Gilson et RO-TAP, présentés à la Figure 2.3, ont été utilisés pour réaliser l'essai granulométrique avec une période de tamisage fixée à 10 minutes pour chaque appareil. La densité brute des granulats a été mesurée en employant la méthode de pesée hydrostatique, en maintenant la température de l'eau à 23 ± 1 °C.

Pour la troisième phase du volet 1, le bitume des GBR a été extrait avec le solvant trichloréthylène (TCE). Par la suite, le mélange a été soumis à une distillation rotative (ROTOVAP) afin de séparer le bitume du solvant. Pour chaque source de GBR, deux échantillons d'une masse de 2500 ± 50 g ont été mélangés avec 800 ml de TCE chacune et agités pendant 30 minutes. Ce mélange de solvant, bitume et filler a été ensuite centrifugé à une vitesse de 2000 rotations par minute pendant 20 minutes pour séparer les fines particules du liquide. Le solvant et le bitume ont alors été transférés dans un ballon de distillation pour la distillation, comme démontré à la Figure 2.5. La méthodologie standard a été respectée et le bitume a été récupéré pour réaliser les essais mentionnés au Tableau 2.3.



Figure 2.5 Distillation du trichloréthylène (TCE) au ROTOVAP

L'essai de pénétration a été effectué directement dans les récipients cylindriques (d'un diamètre de 75 mm et d'une profondeur de 70 mm) où le bitume extrait avait été versé. Avant de procéder

à l'essai, les échantillons ont été conditionnés dans un bain à une température de 25 °C pendant deux heures. L'essai a ensuite été réalisé à l'aide du pénétromètre, tel que décrit à la Figure 2.6. Une tolérance de 2 décimillimètres (dmm) entre les lectures de pénétration a été utilisée pour garantir la consistance des résultats, et les mesures ont été répétées si nécessaire pour respecter cet écart.



Figure 2.6 Pénétromètre

La viscosité des bitumes a été mesurée en utilisant un viscosimètre rotatif Brookfield, comme montré sur la Figure 2.7. Une masse précise de bitume de $8,16 \pm 0,05$ g a été introduite dans le récipient prévu pour l'essai. Ce dernier a ensuite été placé dans un appareil de contrôle de température (thermosel) afin d'élever et de stabiliser la température de l'échantillon aux valeurs requises pour les essais. Les échantillons ont été préconditionnés pendant 10 minutes avec la douille numéro 007 immergée. Après cette période de préparation, la consistance des bitumes a été déterminée par la mesure de la résistance à la rotation de la douille dans le bitume. La durée de l'essai a été 5 minutes, et les valeurs relevées à la 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} minute ont été

enregistrées. La méthode mathématique de la méthode a été utilisée pour calculer les viscosités aux températures lors des essais (méthode LC 25-007).



Figure 2.7 Appareil Brookfield

La température élevée (T_e) du bitume a été évaluée à l'aide du rhéomètre à cisaillement dynamique, ou *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), tel que présenté à la Figure 2.8. Les bitumes ont été coulés dans un moule en silicone de 25 mm de diamètre et d'une épaisseur de 1,25 mm. Une fois le bitume refroidi à température ambiante (environ 25 °C), l'échantillon a été placé dans le DSR à la température initiale d'essai, qui varie de 52 à 64 °C. L'échantillon a été comprimé entre les deux plaques du DSR à une épaisseur de 1,05 mm, puis nivelé pour obtenir un diamètre précis de 25 mm pour être comprimé à une épaisseur finale de 1,00 mm. L'échantillon a été conditionné à la température d'essai pendant 10 minutes avant le début de l'essai. L'essai consistait à appliquer une déformation de 12 % à une fréquence de sollicitation de 1,59 Hz (10 rad/s) et à mesurer la résistance du bitume à ces conditions. Le module de cisaillement (G^*) et l'angle de phase (ϕ) ont été enregistrés. Si la valeur de $G^*/\sin(\phi)$ était supérieure à 1,00 kPa, la température était augmentée de 6 °C et l'échantillon était à nouveau conditionné pendant 10 minutes. Ce processus a été répété jusqu'à ce que la valeur de $G^*/\sin(\phi)$ soit inférieure à 1,00 kPa.

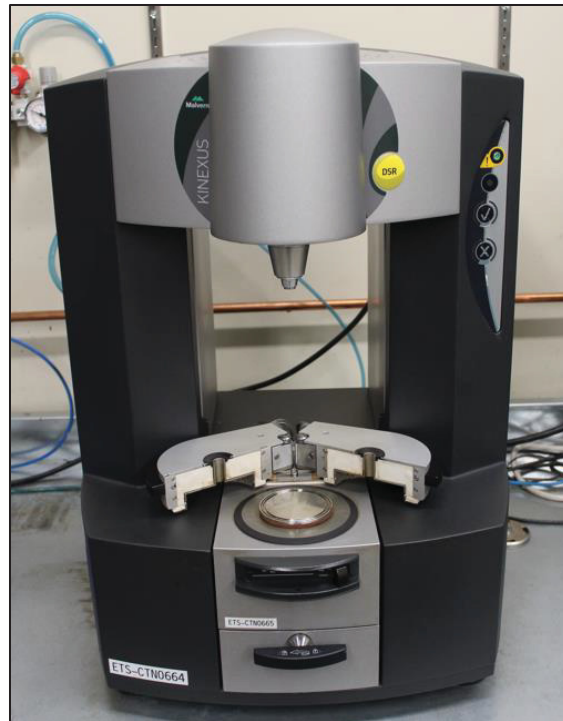


Figure 2.8 Appareil rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR)

La préparation des échantillons pour les essais MSCR suit la même procédure que celle utilisée pour déterminer T_e . Les essais MSCR ont été effectués à une température constante de $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur le même DSR que présenté à la Figure 2.8. Une contrainte de cisaillement de $0,1\text{ kPa}$ a été appliquée à l'échantillon pendant 1 seconde, suivie d'une période de relaxation de 9 secondes. Ce cycle a été répété 20 fois. Ensuite, la contrainte a été augmentée à $3,2\text{ kPa}$ et le cycle contraintes-relaxation est appliqué 10 fois. Les valeurs du taux de récupération non réversible à $3,2\text{ kPa}$ ($J_{nr3,2}$), la différence de taux de récupération non réversible ($J_{nr\text{diff}}$) et le pourcentage de récupération à $3,2\text{ kPa}$ ($R_{3,2}$) ont été enregistrés et utilisés pour l'analyse des résultats.

La température basse (T_b) du bitume a été évaluée à l'aide d'un rhéomètre à flexion de poutre (BBR), comme illustré à la Figure 2.9. Les bitumes ont été coulés dans des moules en aluminium ($6,35 \pm 0,05\text{ mm} \times 12,70 \pm 0,05\text{ mm} \times 127 \pm 5\text{ mm}$) de manière à ce qu'ils débordent légèrement. Après un conditionnement d'une heure à température ambiante, les échantillons ont été nivelés avec une lame chauffée à la flamme, puis à nouveau conditionnés pendant une

heure à température ambiante. Les échantillons ont ensuite été démoulés et placés dans un bain d'essai contenant un mélange d'éthylène glycol à la température d'essai pendant 60 ± 5 minutes. L'essai a commencé par l'application d'une charge initiale de 35 ± 10 mN. Ensuite, une charge de 980 ± 50 mN a été appliquée pendant 1 seconde, suivie d'un retour à une charge de 35 ± 10 mN pendant 20 secondes. La charge a été à nouveau augmentée à 980 ± 50 mN pendant 240 secondes, et les mesures de la résistance en flexion (S) et de la pente d'évolution des contraintes (*m-value*) ont été enregistrées à chaque intervalle de 0.5 seconde.



Figure 2.9 Rhéomètre à flexion de poutre (BBR)

L'analyse du module complexe en cisaillement des bitumes a été réalisée à l'aide du même DSR que celui utilisé pour évaluer T_c , mais en employant une gamme étendue de températures et de fréquences. Trois diamètres d'éprouvettes, présentés à la Figure 2.10, ont été utilisés pour couvrir l'ensemble des températures d'essai :

- De 34 à 82 °C pour les échantillons de 25 mm de diamètre et 1 mm d'épaisseur ;
- De -8 à 34 °C pour les échantillons de 8 mm de diamètre et 2 mm d'épaisseur ;
- De -32 à -2 °C pour les échantillons de 4 mm de diamètre et 2 mm d'épaisseur.

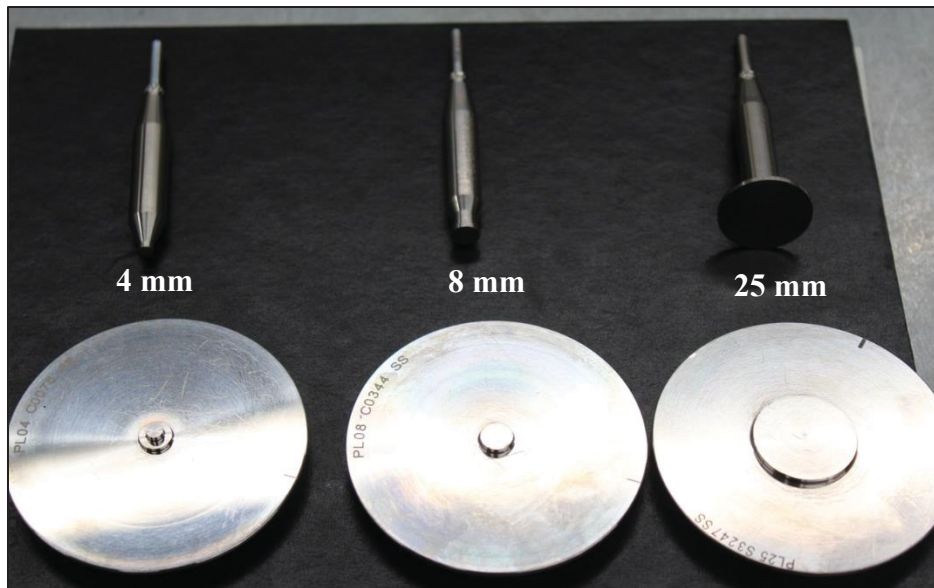


Figure 2.10 Diamètre des éprouvettes au DSR

Pour chaque température, un conditionnement de 10 minutes a été réalisé avant de débuter les sollicitations. 20 fréquences ont été évaluées, allant de 10 Hz à 0,1 Hz. Afin de déterminer le pourcentage de déformation à appliquer pour chaque diamètre d'éprouvette, un essai de linéarité a été réalisé à la température la plus basse afin de rester dans le domaine des petites déformations. Cet essai a été effectué à 1 Hz, avec des déformations variant de 0,001 % à 10 %, et la déformation retenue est celle où environ 95 % de la rigidité est observée.

Une nouvelle éprouvette a été ensuite installée sur le DSR et conditionnée à la température la plus basse pendant 10 minutes avant de commencer la sollicitation à la fréquence la plus élevée, en descendant progressivement jusqu'à la fréquence la plus basse. Une fois le balayage de fréquences terminé, la température est augmentée de 6 °C, et le processus de conditionnement et de balayage de fréquences est répété. Les valeurs de G^* et de ϕ obtenues pour chaque couple fréquences-températures ont été ensuite utilisées pour effectuer la modélisation 2S2P1D.

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, ou *Fourier Transform InfraRed spectroscopy* (FTIR), a été réalisée à l'aide d'un spectromètre de type *PerkinElmer's Spectrum Two*, comme illustré à la Figure 2.11. Une petite quantité de bitume, de l'ordre de quelques

grammes, a été prélevée et placée directement dans un récipient cylindrique sur le spectromètre. Un faisceau de lumière infrarouge est ensuite dirigé sur l'échantillon, et l'énergie absorbée (absorbance) est enregistrée à différentes longueurs d'onde. Ce spectre révèle des pics d'absorption spécifiques qui correspondent aux vibrations moléculaires des groupes fonctionnels présents dans le bitume. Les pics d'absorption pertinents pour l'analyse des bitumes sont détaillés ultérieurement au Chapitre 3. Une vérification de la présence de TCE dans les échantillons a été effectuée à cette étape (longueur d'onde de 930 cm^{-1}).

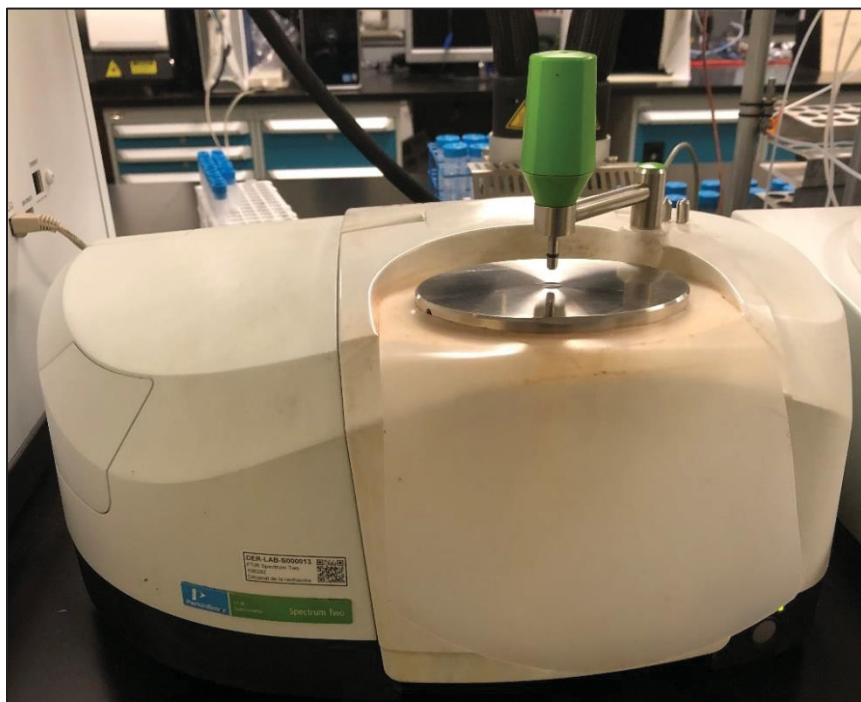


Figure 2.11 Appareil de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

2.3.2 Volet 2 : Impact du malaxage des enrobés en laboratoire

Le principal objectif de la deuxième partie de cette thèse est d'examiner l'impact du type et de la durée de malaxage sur les performances et les propriétés des enrobés contenant 30 % de GBR. Cette partie se concentre sur les expérimentations en laboratoire afin d'ajuster les méthodes de malaxage actuelles et de souligner l'influence des GBR sur ces modifications. Trois types de malaxeurs, illustrés à la Figure 2.12, ont été utilisés : un malaxeur de laboratoire

(*hobart*), un malaxeur à hélice (*pugmill*) et un malaxeur thermorégulé. Chacun de ces malaxeurs a été testé à quatre durées de malaxage différentes, en fonction de leur énergie de malaxage, comme indiqué dans le Tableau 4.4 au Chapitre 4.

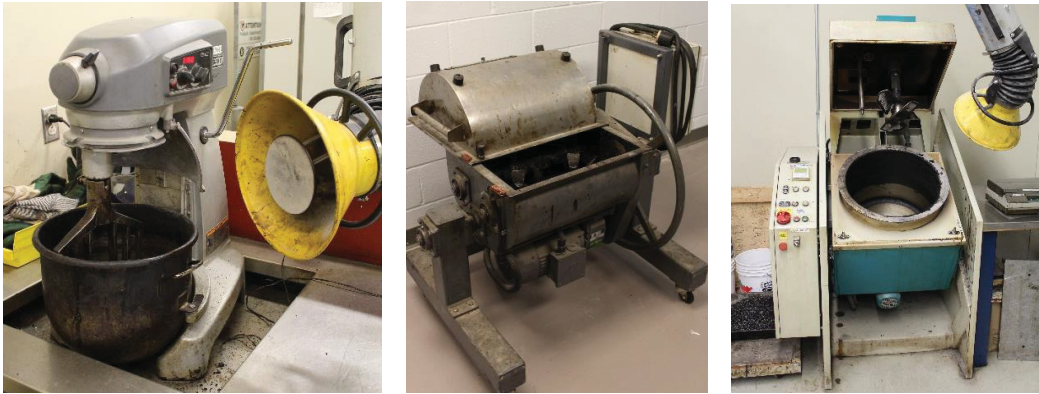


Figure 2.12 Type de malaxeurs de l'étude: a) Malaxeur de comptoir Hobart; b) Malaxer à hélice Pugmill; et c) Malaxeur thermoréguler

Pour préparer les matériaux, tous les granulats vierges ont été tamisés et lavés avant d'être combinés à nouveau une fois secs afin de garantir une granulométrie uniforme pour les 12 mélanges étudiés (4 temps de malaxage par malaxeur). Les GBR ont été placés dans une étuve à 40 °C pendant au moins 3 jours ou jusqu'à ce qu'une masse constante soit atteinte entre deux mesures (4 heures d'étuvage), suivis d'une séparation mécanique pour obtenir les masses requises. Durant le séchage des GBR, les matériaux ont été mélangés manuellement pour éviter la formation d'une croûte qui empêcherait l'évaporation de l'eau des GBR et cause de l'agglomération des granulats.

Le conditionnement des matériaux avant le malaxage varie en fonction du type de malaxeur utilisé et est décrit dans le Tableau 4.4 de la section 4.3.3. Les durées de malaxage y sont détaillées aussi. Après le malaxage des enrobés, la préparation des échantillons pour les différents essais a été réalisée par séparation mécanique, comme illustrée à la Figure 4.1. Le Tableau 2.4 récapitule les neuf types d'essais réalisés dans le cadre de cette partie de l'étude.

Tableau 2.4 Liste des essais du volet 2

Essai	Caractéristique évaluée	Paramètres essai	Méthode
Densité maximale	d_{mm}	25 °C	LC 26-045
Teneur en bitume	p_b	450 °C	LC 26-006
Granulométrie	---	---	LC 26-007
Compactabilité à la PCG	V_i	135 °C	LC 26-003
Compaction Marshall	V_i	135 °C	LC 26-020
Densité brute	d_{mb}	25 °C	LC 26-040
Module de rigidité en traction indirecte	E	-20, -10, 0 et 10 °C	NF EN 12697-26
Traction indirecte	IDT	25 et -20 °C	ASTM D6931-17
Indice de tolérance des fissures	CT_{index}	25 et -20 °C	ASTM D8225-19

Pour l'évaluation de la d_{mm} des enrobés fabriqués lors du deuxième volet de l'étude, le même appareil que celui utilisé dans le premier volet a été employé. Cependant, une étape supplémentaire de cure à la température de compaction (135 °C) pendant deux heures a été introduite avant la réalisation des essais. Cet essai permet notamment de déterminer les propriétés volumétriques, telles que le pourcentage de bitume absorbé (P_{ba}) et le volume de bitume effectif (V_{be}). L'objectif de l'essai de teneur en bitume était double : confirmer la teneur réelle en bitume et observer l'effet du malaxage sur la granulométrie. Une énergie de malaxage plus élevée peut entraîner un fractionnement des granulats, ce qui peut avoir un impact sur les propriétés de l'enrobé.

Deux méthodes de compaction ont été utilisées pour ce volet : la compaction Marshall et la compaction avec la presse à cisaillement giratoire (PGC), comme illustré à la Figure 2.13. Les échantillons ont été conditionnés à la température de compaction pendant deux heures avant les essais. Pour la compaction Marshall, 40 coups de marteau ont été appliqués sur chaque côté des échantillons, et deux spécimens ont été compactés simultanément. Un total de 6 éprouvettes a été compacté. Les éprouvettes Marshall ont été conservées 24 heures dans le moule avant démoulage. Pour la PGC, l'essai a été réalisé en appliquant une pression de 600 kPa et en effectuant des girations à une vitesse de 30 rotations par minute, avec un angle d'inclinaison interne de 1,16° pour simuler l'effet de pétrissage lors de la compaction sur le

chantier. L'essai s'est achevé après 200 girations, et les vides ont été évalués par des mesures volumétriques.

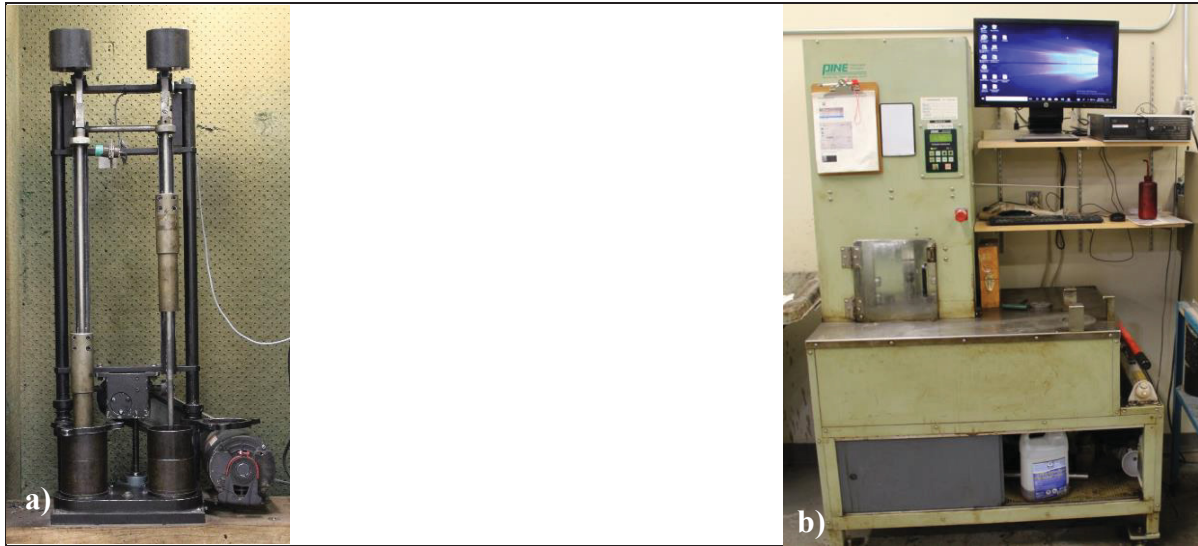


Figure 2.13 Méthode de compaction : a) Compaction Marshall; et
b) Presse à cisaillement giratoire (PCG)

La détermination de la densité brute (D_{mb}) des éprouvettes Marshall a été effectuée par pesée hydrostatique (Figure 2.14). Les éprouvettes ont d'abord été pesées à l'état sec dans l'air, puis immergées dans un bain d'eau à une température de $25 \pm 0,5$ °C pendant une durée de 3 à 5 minutes avant de procéder à la pesée sous l'eau. Par la suite, les éprouvettes ont été amenées à l'état saturé superficiellement sec (SSS) et leur masse a été enregistrée. Les vides des éprouvettes ont ensuite été calculés et les échantillons ont été regroupés par lots (3 éprouvettes par lot) afin d'obtenir des indices de vides similaires dans chaque lot.

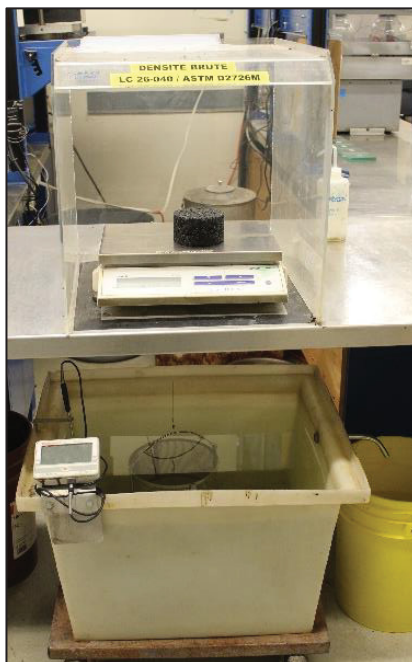


Figure 2.14 Détermination de la densité brute de l'enrobé

Les essais d'ITSM ont été réalisés à l'aide de presses MTS, comme illustré à la Figure 2.15. Avant de procéder aux essais, les échantillons ont été conditionnés à la température d'essai dans une chambre thermique pendant au moins 4 heures. Lors de l'essai, un dispositif de chargement a appliqué une série de 11 charges de compression diamétrale sur l'éprouvette, perpendiculairement à son axe longitudinal, à un taux de chargement constant. La déformation horizontale de l'éprouvette a été mesurée pendant l'application de la charge. La force appliquée était basée sur une déformation horizontale cible de $4 \pm 1 \mu\text{m}$. La rigidité de l'échantillon a été déterminée en calculant le module de rigidité indirecte, qui est le rapport entre la charge appliquée et la déformation correspondante, selon l'Équation 1.35. Chaque échantillon a été soumis à l'essai sur deux axes, à 0 et 90°.

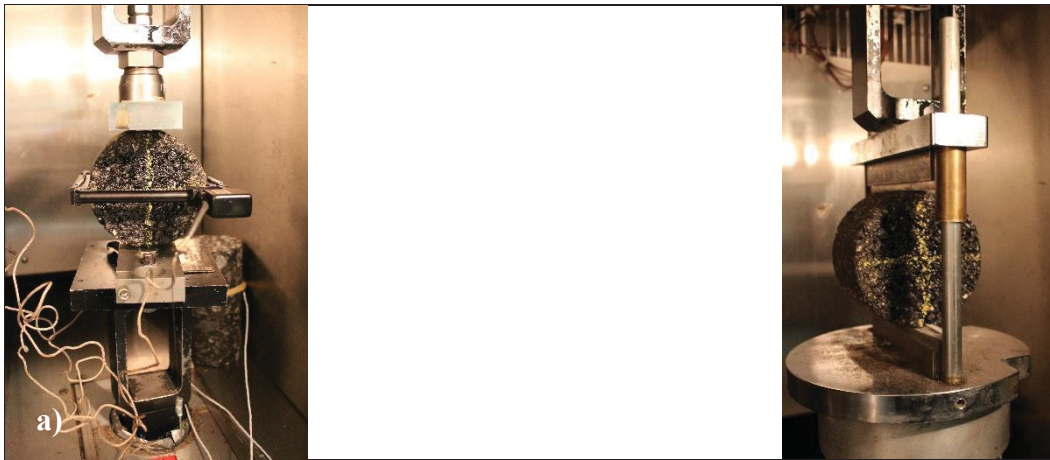


Figure 2.15 Essais d'évaluation de la rigidité : a) Module de rigidité en traction indirecte (ITSM); et b) Traction indirecte (IDT)

Les essais IDT et CT_{index} ont été effectués sur les mêmes éprouvettes et sur la même presse que celle présentée à la Figure 2.15. Les échantillons ont été soumis à un conditionnement thermique à la température d'essai pendant une durée minimale de 4 heures avant de procéder aux essais. La vitesse de déplacement de la presse était contrôlée à $50,8 \pm 1,3$ mm/min, et la charge appliquée a été enregistrée tout au long de l'essai. Le calcul de l'IDT s'est basé sur la charge maximale atteinte pendant l'essai, tandis que le CT_{index} a été déterminé à partir de l'aire sous la courbe de l'essai. Des précisions sur les essais sont présentées au Chapitre 4.

2.3.3 Volet 3 : Évaluation de l'activation du bitume des granulats bitumineux recyclés

L'objectif principal du dernier volet de cette thèse est de mettre en évidence l'influence du paramètre ratio de bitume recyclé (RBR) sur les performances et les propriétés des enrobés contenant différents taux de GBR, allant de 0 à 100 %, tout en considérant deux niveaux de mobilisation du bitume. En outre, cette étude cherche à développer une méthode pour évaluer les performances des enrobés avec GBR sans recourir à l'extraction par solvants, favorisant ainsi une démarche plus sûre et écologique. Enfin, l'impact de l'utilisation de la charte de mélange sur les performances des enrobés, généralement appliquée aux propriétés des bitumes (Figure 1.38), est examiné.

Pour atteindre ces objectifs, cinq teneurs en GBR (0, 15, 30, 45 et 100 %) ont été étudiées, avec deux scénarios relatifs au degré de mobilisation du bitume des GBR. Le premier scénario considère que 100 % du bitume provenant des GBR est mobilisable, ce qui signifie qu'il peut pleinement contribuer à la performance de l'enrobé. Dans le second scénario, seulement 60 % du bitume de GBR est considéré comme mobilisable, contribuant ainsi à la cohésion du matériau, en se basant sur la quantité totale de bitume du mélange 100 % GBR. Ce second scénario est appliqué uniquement aux mélanges contenant 15, 30 et 45 % de GBR.

Pour ce volet, une plus grande quantité d'enrobé a été produite, ce qui a nécessité une séparation mécanique de tous les matériaux granulaires (GBR et granulats vierges) afin d'obtenir les masses requises. Les combinés granulaires ont une granulométrie similaire et sont présentés au Chapitre 5 avec leur conditionnement. Le malaxeur thermorégulé a été utilisé pour le malaxage, et la durée de ce dernier a été déterminée en fonction des résultats obtenus dans le volet. Les températures de malaxage et de compaction ont été maintenues constantes pour toutes les formulations, à 140 °C et 130 °C respectivement. Le Tableau 2.5 présente les essais réalisés lors du volet 3.

Tableau 2.5 Liste des essais du volet 3

Essai	Caractéristique évaluée	Paramètres essai	Méthode
Densité maximale	d_{mm}	25 °C	LC 26-045
Compactabilité à la PCG	V_i	130 °C	LC 26-003
Orniérage MLCP	Déformation permanente	52 °C	LC 26-410
Comportement viscoélastique (module complexe)	$ E^* $ et δ	-35 à 35 °C 10 à 0,01 Hz	LC 26-700
Fissuration thermique (TSRST)	$\theta_{rupture}$ et $\sigma_{rupture}$	-10 °C/heure	AASHTO TP 10-90

À l'exception des échantillons destinés à évaluer l'orniérage, les enrobés malaxés ont été conditionnés dans une étuve à 130 °C pendant deux heures. Par la suite, les enrobés ont été séparés mécaniquement et remis à l'étuve si nécessaire jusqu'à atteindre la température d'essai.

Les essais ont été réalisés immédiatement après avoir atteint cette température. Les essais de densité maximale du mélange (d_{mm}) et de compactabilité à la presse à cisaillement giratoire (PCG) ont été effectués avec les mêmes appareils que ceux utilisés dans les volets 1 et 2.

Les échantillons pour l'essai d'orniérage ont été compactés avec le compacteur à plaque LCPC, comme illustré à la Figure 2.16. Les plaques ont été compactées par isocompaction, c'est-à-dire en suivant la même procédure de compaction. Une fois la compaction terminée, les éprouvettes ont été conservées au minimum 48 heures avant de procéder à la pesée hydrostatique pour déterminer les vides dans les plaques. Ensuite, les plaques ont été placées dans l'appareil MLPC pour effectuer une première lecture des hauteurs afin de déterminer la hauteur réelle de la plaque. Un total de 1000 cycles à froid a été appliqué sur les plaques avec une pression de 600 ± 30 kPa à une fréquence de $1 \pm 0,1$ Hz. La profondeur d'orniérage à froid a été mesurée, puis le chauffage à la température d'essai a été effectué pour ensuite réaliser un cumul de 1000, 3000, 10000 et 30000 cycles. L'évolution de la profondeur d'orniérage a été mesurée à chaque palier de cycles mentionné.



Figure 2.16 Compacteur LCPC

Pour analyser le comportement viscoélastique et la résistance à la fissuration thermique, une plaque d'enrobé de dimensions $400 \times 600 \times 125 \text{ mm}^3$ a été compactée avec le compacteur LCPC par isocompaction. L'enrobé compacté a été conservé pendant deux semaines avant de procéder au prélèvement des échantillons. Le carottage a été réalisé avec les équipements illustrés à la Figure 2.17, permettant d'obtenir deux éprouvettes cylindriques de $76 \pm 0,5 \text{ mm}$ de diamètre et $150 \pm 2 \text{ mm}$ de longueur (pour l'évaluation du comportement viscoélastique) et trois éprouvettes de $58 \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre et $250 \pm 5 \text{ mm}$ de longueur (pour les essais TSRST).

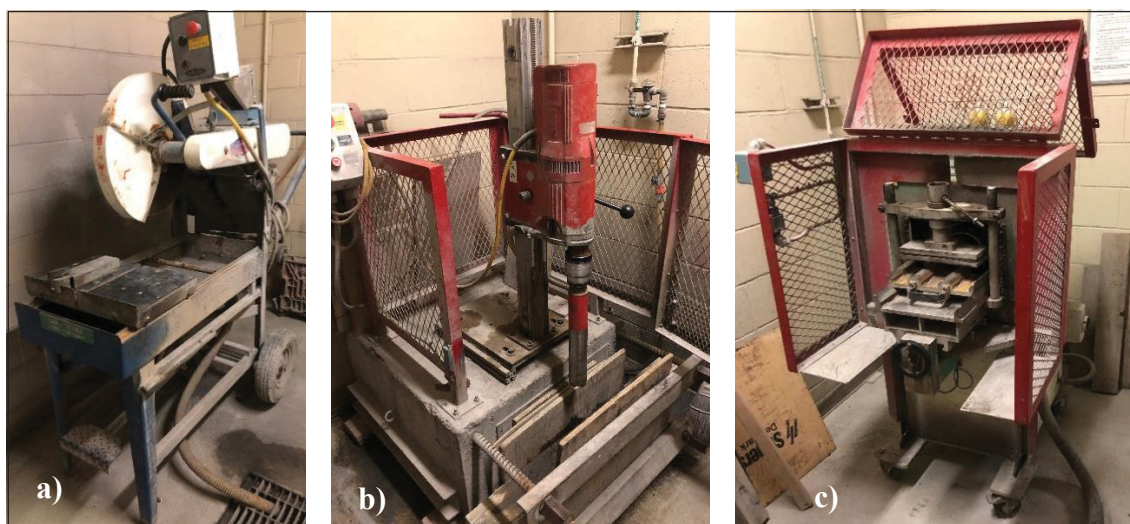


Figure 2.17 Équipements pour la préparation des éprouvettes :
a) Scie à l'eau; b) Carotteuse et c) Surfaceuse

La pesée hydrostatique et les mesures volumétriques ont ensuite été effectuées selon la procédure décrite dans le volet 2, en prenant la moyenne de trois mesures de diamètre et de hauteur. Les éprouvettes ont été placées dans un bac de sable à côté d'un ventilateur pendant deux semaines avant de procéder aux essais. Des précisions sur les essais sont présentées au CHAPITRE 5.

2.4 Organisation du document

La revue de littérature du CHAPITRE 1 a permis de présenter certaines notions relatives aux enrobés bitumineux, soit une description générale des constituants et du comportement des

enrobés. De plus, la revue des connaissances sur les GBR et de leurs impacts sur les enrobés a été présentée ainsi qu'un sommaire des recherches réalisées jusqu'à présent qui portent sur l'utilisation des GBR dans les enrobés à chaud. Le CHAPITRE 2 décrit les objectifs de la recherche, la méthodologie, les matériaux et l'organisation du document.

Le CHAPITRE 3 présente le premier article, intitulé "*Physical, rheological, and infrared absorbance properties of several sources of reclaimed asphalt pavement from the same area in Montreal region*". Cet article porte sur le premier volet de cette thèse : Caractérisation des GBR. Ce chapitre détaille la variabilité marquée entre les différentes réserves de GBR et souligne l'importance cruciale de leur caractérisation précise afin de prévenir la dégradation précoce des enrobés qui en contiennent en grande proportion. Il ressort de l'étude que les propriétés rhéologiques varient significativement d'un GBR à l'autre, et des traces de polymères ont été détectées dans certaines sources. La granulométrie des GBR s'est révélée relativement homogène. L'analyse FTIR a révélé certains indices liés au degré d'oxydation des matériaux. Ce premier article a été soumis dans la revue *Road, Materials and Pavement Design* en novembre 2022 et est en cours de révision.

Le CHAPITRE 4 présente le second article, nommé "*Laboratory study of the effects of the mixer type and mixing time on the volumetric properties and performance of a HMA with 30 percent reclaimed asphalt pavement*". Cet article porte sur le deuxième volet : l'impact du malaxage en laboratoire. Dans cet article, les résultats expérimentaux ont démontré qu'augmenter le temps de malaxage affecte les propriétés volumétriques de l'enrobé. De façon générale, un temps de malaxage plus important augmente la compactabilité de l'enrobé. Des malaxeurs avec une plus forte énergie de malaxage génèrent davantage de particules fines. Les propriétés mécaniques des mélanges sont plus influencées par les conditions de malaxage que par les vides. Bien que les vides affectent la rigidité, d'autres facteurs comme les propriétés volumétriques et la mobilisation du bitume des GBR sont également déterminants. Les essais IDT révèlent que le type de malaxeur et la durée d'utilisation influencent la rigidité, sans corrélation avec les vides. À 25 °C, les résultats sont bons, mais à -20 °C, la résistance à la fissuration est absente, l'enrobé devenant fragile. Plus d'énergie est stockée à 25 °C, malgré

une charge maximale plus élevée à -20 °C. Cet article a été publié dans la revue *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* en décembre 2022.

Le CHAPITRE 5 présente le troisième article, "*Exploring the effects of rap bitumen mobilization on hot-mix asphalt performance and the use of bitumen blending charts to predict them: a laboratory investigation*". Cet article porte sur le troisième volet : l'évaluation des performances des enrobés avec GBR, l'activation du bitume des GBR et prédiction du comportement. Les calculs des propriétés volumétriques ont confirmé que tous les enrobés présentent des propriétés similaires, permettant de se concentrer sur l'impact du GBR, à l'exception des mélanges où 60% du bitume issu des GBR est considéré mobilisable. Les essais ont démontré qu'une augmentation de la teneur en GBR améliore la compactabilité, la résistance à l'orniérage et la rigidité dans l'enrobé et affecte négativement la résistance à la fissuration thermique. Les résultats suggèrent qu'il est possible de prédire la performance de compactabilité des mélanges en fonction du RBR, vérifiant qu'il est possible de retirer l'extraction par solvant lors des prochaines études. Cet article a été soumis dans la revue *Journal of Testing and Evaluation* en avril 2024 et est en révision.

Enfin, une conclusion regroupant les avancées découvertes dans cette recherche avec des recommandations est présentée. Trois articles de conférences ont été rédigés en parallèle. À l'ANNEXE I, on retrouve le premier article de conférence accepté pour la 66e conférence annuelle de la *Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*. Cet article est intitulé "*Impact of mixer type and mixing time for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content on mix performance*". À l'ANNEXE II on retrouve le deuxième article, présenté à la conférence 2022 de l'*International Society for Asphalt Pavement (ISAP)*, est intitulé "*Rheological and physcal properties of multipple reclaimed asphalt pavement sources from quebec, canada*". Le dernier article de conférence est présenté à l'ANNEXE III, accepté pour la conférence 2024 de l'ISAP et est nommé "*Laboratory study: assessing bitumen blending charts for asphalt mixes with recycled asphalt pavement*". L'ANNEXE IV et l'ANNEXE V présentent les fiches descriptives des matériaux granulaires et des bitumes, respectivement. L'ANNEXE VI présente les feuilles de formule des enrobés étudiés dans cette thèse.

L'ANNEXE VII présente les résultats bruts des essais réalisés. Il faut souligner que dans ce document bilingue, le terme anglais "RAP" (*Reclaimed Asphalt Pavement*) correspond au terme français GBR.

CHAPITRE 3

PHYSICAL, RHEOLOGICAL, AND INFRARED ABSORBANCE PROPERTIES OF SEVERAL SOURCES OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT FROM THE SAME AREA IN MONTREAL REGION

Marc-André Bérubé^a, Sébastien Lamothe^b, Kevin Bilodeau^c, Gabriel Orozco^d and Alan Carter^e

^{a,b,d,e} Department of Construction Engineering, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

^c Bauval Inc.
210 Bd De Montarville, Boucherville, Québec J4B 6T3

Article soumis pour publication dans la revue « *Road, Materials and Pavement Design* », novembre 2022

3.1 Abstract

This study investigates the effects of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) content and source on asphalt mix performance, analyzing eight RAP sources from the Montreal area. It characterizes the physical, rheological, and infrared absorbance properties of RAP materials, RAP aggregates and extracted bitumen. The research finds that finer RAP has a higher bitumen content, while RAP aggregates display consistent intrinsic properties. Significant variability in rheological properties is observed in RAP bitumen, particularly in finer RAP, indicating the presence of polymers and stiffer bitumen. The 2S2P1D model, applied for assessing linear viscoelastic behaviour, corroborates these observations. Furthermore, FTIR indices offer insights into bitumen oxidation, enhanced by including two virgin bitumens in the analysis. The sulphoxide and long chain indices appear to be reliable indicators for categorizing the oxidation level of bitumen. This study highlights the critical need for detailed RAP characterization to optimize asphalt mix performance and encourage more effective recycling in asphalt production.

3.2 Introduction

The use of recycled materials, such as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), is increasingly used in asphalt mixes. Despite its benefits, the use of high RAP contents (over 30%) remains limited in Canada, partly due to traditional project specifications and concerns about the performance and workability of RAP-enriched asphalt. Canada's road network is the seventh largest in the world with just over 1,000,000 km and approximately 95 % of paved roads are asphalt pavements (PIARC, 2015). According to the Canadian Infrastructure Report, over 25 % of municipal roads are in a condition considered fair, poor or very poor (BRIC, 2016). On-road experience and laboratory research have demonstrated the benefits of using RAP (Chesner & al., 2002; Muñoz Perez & Onofre Maicelo, 2021). In addition of substantial cost savings and lesser environmental footprint of pavements by preventing the discharge of asphalt material in landfills, the use of RAP provides aggregates that have been previously selected for their quality to perform on the road (Hansen & al., 2013). On the technical plan, using RAP in new asphalt materials increases the water and stripping resistances (Al-Qadi & al., 2012). Bitumen from the RAP still has viscoelastic properties that can affect the asphalt mix, even if it is aged (Noferini & al., 2017). Also, using RAP in new asphalt mixtures reduces the quantity of required new virgin bitumen and aggregates.

The existing methods for designing RAP asphalt mixtures are limited by prevailing construction regulations and an incomplete understanding of their properties (Basueny, Perraton & Carter, 2014). There is a noticeable gap in knowledge concerning the effects of variations in RAP material composition from different sources on the final mix design. Additionally, there is an insufficient understanding of the interactions between RAP and newer bitumens and additives. Moreover, the long-term performance of pavements made with high RAP content remains uncertain due to a lack of comprehensive data on their durability and lifespan. These limitations impact the permissible amount of RAP in new mixes. RAP's traditional characterization focuses on its physical properties, such as asphalt content, specific gravity, and particle size distribution, because these mix design parameters are sufficient for incorporating small amounts of RAP without adversely affecting the mix's performance.

However, when the RAP content exceeds a certain content, further testing including bitumen property analysis, as well as usage of blending charts, becomes necessary (Carter & al., 2018).

To assess the properties of RAP bitumen, it is necessary to extract it using a solvent like trichloroethylene, followed by distillation to remove the solvent (Ge & al., 2019). This process allows the bitumen to be characterized in a manner akin to standard bitumen (Shen & Ohne, 2002). Consistency is typically evaluated through penetration tests in line with the ASTM D5 standard (Chattaraj, 2011). The viscosity, another crucial aspect, is measured using a Brookfield rotational viscometer at specific temperatures to determine its appropriateness for mixing and compaction processes.

The Performance Grading (PG) system, based on the SUPERPAVE methodology, is utilized to evaluate the bitumen's suitability across various temperatures, considering factors like rutting and thermal cracking resistance (Zaumanis, Mallick & Frank, 2014; Zeiada & al., 2022). This grading system, which aligns with traffic and aging levels, employs tests like the Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) for short-term aging and the Pressure Aging Vessel (PAV) for long-term aging. The Dynamic Shear Rheometer (DSR) assesses high-temperature performance, while the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test, a recent addition to standards, evaluates rutting performance (Salim & al., 2019; Baumgardner, 2020). Parameters like non-recoverable creep compliance and elastic recovery from these tests help determine the traffic level suitability of the bitumen (Hossain, Zaman & Ghosh, 2015). For low-temperature evaluations, the Bending Beam Rheometer (BBR) is used, ensuring the bitumen's ability to withstand deformation without cracking (Elkashef, Williams & Cochran, 2018).

In asphalt mixes with a high RAP content (above 30%), blending charts are crucial for evaluating mix properties like temperature ranges and traffic levels. These analyses consider both RAP and virgin bitumen, factoring in the Recycled Bitumen Ratio (RBR) (Shirodkar & al., 2013; Arámbula-Mercado & al., 2018). Additionally, a solvent-free characterization method has been developed to accurately predict the true high and low temperature grades of RAP using a mortar approach, offering an efficient and environmentally friendly alternative

for RAP evaluation (Yan & al., 2023). Among other properties, the linear viscoelastic (LVE) behaviour of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) bitumen is of particular importance, as it provides insights into how the bitumen will respond to various temperature-stress combinations. The calibration of rheological models, such as the 2S2P1D model, has proven effective in exploring the LVE behaviour of RAP bitumen (Mangiafico & al., 2014). Moreover, rheological models help deriving synthetic, useful performance indices. A good example is the Glover-Rowe parameter, a tool for evaluating non-load related distress in asphalt bitumens. This parameter is instrumental in assessing the ability of an asphalt mixture to withstand cracking under repeated loading and environmental conditions, such as temperature fluctuations (Mensching & al., 2016).

Using physico-chemical properties to predict thermomechanical performances of bitumen has been an enduring challenge for paving technologists (Zhang & al., 2020). One of the main techniques is the Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR), a method for rapid molecular composition analysis, providing insights into the structural characteristics of the bitumen (Weigel & Stephan, 2018; Daly, Negulescu & Balamurugan, 2019). It measures the intensity and wavelength of infrared radiation absorption, which is directly influenced by the chemical makeup of the sample (Mikhailenko, Bertron, & Ringot, 2016). FTIR analysis is particularly advantageous for investigating the aging of bitumen, focusing on the identification and quantification of specific molecular compounds such as (but not limited to) carbonyls ($C=O$) and sulfoxides ($S=O$), which commonly serve as indicators of oxidative aging (Nivitha, Prasad & Krishnan, 2016; Mirwald & al., 2020).

This study focuses on the characterization of RAP materials and their respective aggregates and bitumen, employing tests such as maximum specific gravity, asphalt content, particle size distribution, and specific bulk density. For RAP bitumen, various tests including penetrometer, Brookfield rotational viscometer, dynamic shear rheometer, multiple stress creep recovery, bending beam rheometer, complex shear modulus, and Fourier transform infrared spectroscopy are utilized. Through these tests, the LVE behaviour of RAP bitumens is determined and modelled with the 2S2P1D model. Given that all RAP sources originate from the same climatic

region, it is hypothesized that their properties should be similar, reflecting their shared exposure to the same environmental conditions over their life cycle. The objectives of this research are to:

- Analyze the variation in properties of RAP sourced from the same area.
- Develop a comprehensive method for characterizing RAP, RAP aggregates and bitumen.
- Assess the presence of polymers and the extent of oxidation in bitumen extracted from RAP combining LVE behaviour and FTIR analysis.
- Identify and highlight key RAP properties for integration into existing asphalt mix design methodologies.

3.3 Experimental methodology and materials

Figure 3.1 presents the schematic diagram of the experimental methodology. A total of eight (8) sources of RAP, all coming from the same area in the Montreal region, in the southwest of Quebec, in Canada, were selected. For this study, six (6) sources of RAP with a maximum size of 10 mm (0/10) and two (2) sources with a maximum size of 20 mm (0/20) have been selected. Unfortunately, no information on the age and position (base or surface course) of the RAP sources is available. The properties of the RAPs differ, the variability of these materials, because they come from older pavements with different HMA components, service life and traffic levels.

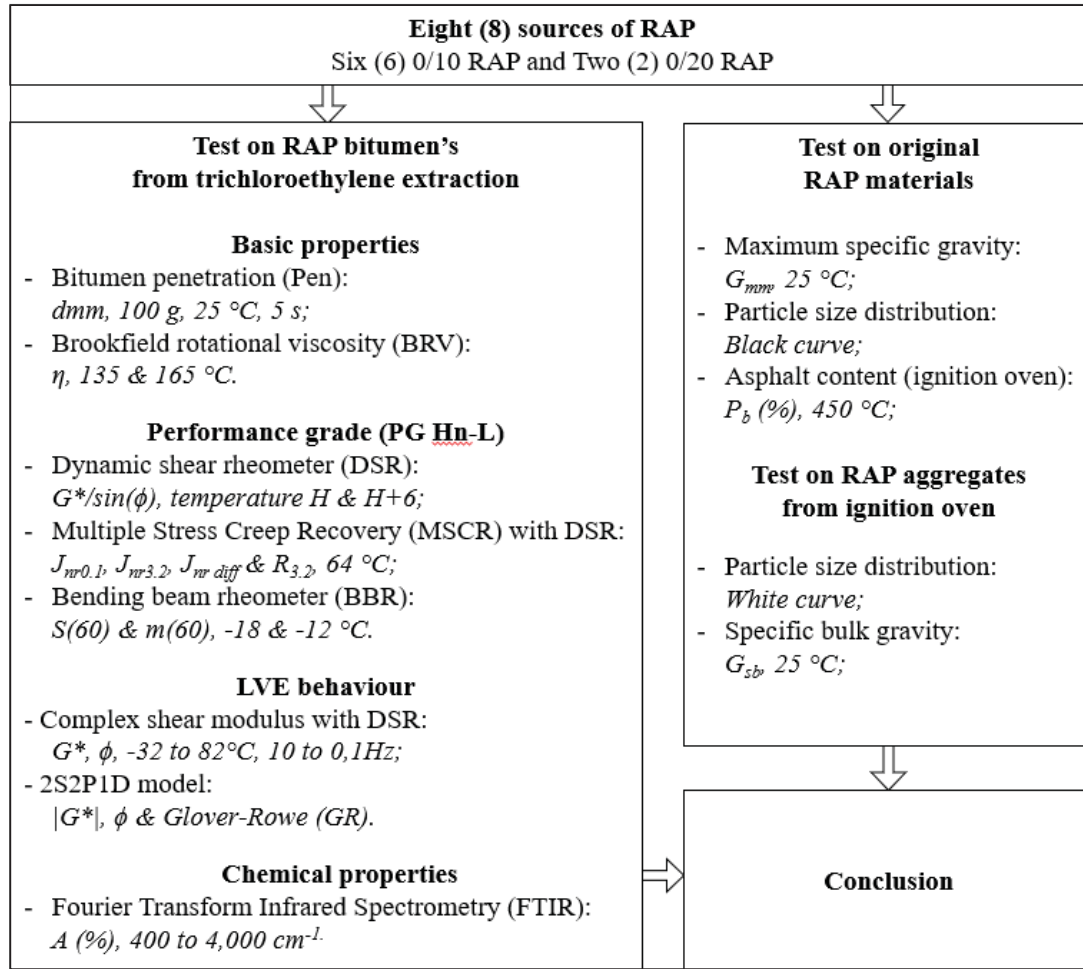


Figure 3.1 Schematic diagram of the experimental methodology

3.3.1 Characterization of RAP materials and RAP aggregates

In the initial phase of this research, conventional characterization methods were applied. On the RAP materials, the maximum specific gravity (G_{mm}) and the asphalt content ($P_{b, \text{real}}$) have been conducted according to the LC 26-045 and LC 26-006 Quebec test methods, respectively (LC: *Laboratoire des chaussées*). The LC 26-007 Quebec test method was used for determined the particles size distribution for RAP materials (black curve) and for RAP aggregates (white curve) from the ignition oven. The effective specific gravity (G_{se}) is calculated with the specific bulk gravity (G_{sb}) of RAP aggregates (LC 21-065 and LC 21-067 Quebec test methods), and

the asphalt content ($P_{b, \text{real}}$) and the maximum specific gravity (G_{mm}) determined on RAP material (LC 26-006 and LC 26-045 Quebec test methods).

3.3.2 Characterization of RAP bitumens

The RAP bitumen was extracted with trichloroethylene following the LC 25-001 Quebec test method. Tests on RAP bitumen were done based on the traditional (basic and physical properties), performance grading (PG: SUPERPAVE methodology), rheological (LVE properties) and physico-chemical (infrared absorbance properties) characterization. In order to provide a baseline comparison for the properties of the RAP bitumens, which are inherently well-oxidized due to their pre-used nature, two types of unaged virgin bitumens (PG 64E-28 and PG-52S-34) were included in the study. These virgin bitumens have not undergone artificial aging processes, allowing for a clearer assessment of the aging effects present in the RAP bitumens.

To evaluate the consistency of the RAP bitumen, the penetration test was achieved following the ASTM D5 standard at 25 °C to find out the value of needle penetration (expressed in 10^{-1} mm or dmm). The total weight of the loading was 100 grams and the penetration time was 5 seconds.

The BRV tests were conducted at 135 and 165 °C (AASHTO T316 standard) on a DV2TLV touch screen viscometer with the AMETEK SC4-21 spindle. After, considering the viscosity of 0.17 and 0.28 Pa·s, the mixing and the compaction temperatures (T_{mixing} and $T_{\text{compaction}}$) are established, respectively.

To find the T_{high} and H , the DSR was set on shear strain control of 10 % and a frequency of 10 rad/sec (1.59 Hz) was applied on the 25 mm diameter plate for all tests (AASHTO T315 standard). With a 1 mm gap between plates (or specimen thickness), the tests were done first at 64 °C and an increment on 6 °C was applied when the ratio of $|G^*|/\sin(\phi)$ was over 1.0 kPa.

To evaluate the traffic class (n) of the evaluated bitumen for the Montreal region with the MSCR, tests must be conducted at 64 °C. All the MSCR tests were done at this temperature, although the high temperature grade may be higher (H) (AASHTO, 2023).

The BBR was used to determine the critical low temperature (T_{low}) and the low temperature grade (L) of the RAP bitumens by recording the creep stiffness $S(60)$ and the stiffness slope $m(60)$ at 60 seconds, while considering the criteria for these two (2) parameters. T_{low} was calculated from the more restrictive of the two parameters. The difference between T_{low} obtained from $S(60)$ and $m(60)$ is called ΔT_c and is an index to measure the loss of bitumen relaxation properties (AASHTO, 2022). BBR testing temperature were done at -12 and -18 °C i.e. a temperature 10 °C higher than that determined by T_{low} and the L. The DSR, BBR and MSCR results are combined to define the PG H-L or PG Hn-L of the bitumens.

To have an extended evaluation of the linear viscoelastic (LVE) behaviour, complex shear modulus (G^*) tests have been conducted at 20 temperatures varying from -32 to 82 °C and 20 frequencies varying from 0.1 to 10 Hz. Three (3) different plates sizes have been used on different temperatures has shown on Tableau 3.1.

Tableau 3.1 G^* testing conditions, plates diameter and specimen thickness

Testing temperatures (°C)	Plate diameter (mm)	Specimens thick. (mm)	Testing frequencies (Hz)
34, 40, 46, 52, 58, 64, 70, 76 and 82	25	1	10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2,
-8, -2, 4, 10, 16, 22, 28 and 34	8	2	1.59, 1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6,
-32, -26, -20, -14, -8 and -2	4	2	0.5, 0.4, 0.3, 0.2 and 0.1

The William-Landel-Ferry (WLF) equation was calibrated to model The Time-Temperature Superposition Principle (TTSP). The linear viscoelastic (LVE) behaviour of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder was modelled using the 2S2P1D rheological model. This model, consisting of two springs, two parabolic elements, and one dashpot, is well-suited for describing the LVE behaviour of bituminous materials in the low deformation domain, including RAP bitumen (Olard & Di Benedetto, 2003; Mangiafico, Sauzéat & Di Benedetto,

2019a; 2019b). The Glover-Rowe (GR) parameter, a key indicator for assessing non-load related distress in asphalt binders, was calculated using the 2S2P1D model according to Equation (3.1):

$$GR \text{ (MPa)} = \frac{G^* \cdot (\cos \phi)^2}{\sin \phi} \quad (3.1)$$

Where G^* represents the complex shear modulus measured in MPa, and ϕ is the phase angle in degrees. These parameters were obtained at an equivalent frequency of 0.005 rad/s for a reference temperature of 15°C. The GR parameter provides insights into the binder's stiffness and relaxation characteristics. Values of the GR parameter below 0.18 MPa indicate an acceptable level of performance with no risk of block cracking, while values above 0.45 MPa suggest a high risk of block cracking. The range between 0.18 MPa and 0.45 MPa is considered the damage zone, indicating a potential transition towards block cracking (Hajj & al., 2016).

The FTIR tests established the absorbance spectrum (A, %) of all the tested bitumens. To avoid oxidation during sample preparation, the bitumen was scooped from its original storage beaker and applied to the measurement system's diamond crystal without any heating and using a metal spoon. Pressure was then applied to create a thin bitumen film with a thickness of 50 μm . For each bitumen type, three separate measurements were carried out within a wavenumber spectrum of 400 to 4,000 cm^{-1} , at a 4 cm^{-1} resolution, then mathematically interpolated to a 1 cm^{-1} resolution for smoother calculations. Aging was assessed quantitatively by employing indices related to the concentration of specific chemical groups, including carbonyls (C=O), sulfoxides (S=O), aromatics (C=C), long chains ($(\text{CH}_2)_n$), etc. as outlined in Tableau 3.2. These indices are determined by first measuring the area between a particular bond's peak and its background linear baseline, between predefined wavenumbers (Nivitha & al. 2016). For instance, $A_{1678-1725}$ (carbonyl peak) denotes such area measured between 1678 cm^{-1} and 1725 cm^{-1} . The indices are then calculated by dividing these areas by the sum of all peaks areas (ΣA).

Tableau 3.2 Principal FTIR indices used to evaluate bitumen ageing
Tirée de Nivitha & al. (2016)

Bond	Type of Bond	Acronym	Index
Sulphoxide	S=O	SI	$A_{990-1050} / \Sigma A$
Carbonyl	C=O	CI	$A_{1678-1725} / \Sigma A$
Aromaticity	C=C	ARI	$A_{1530-1550} / \Sigma A$
Long chain	$(CH_2)_n$	LCI	$A_{715-733} / \Sigma A$
Aliphaticity	C-CH ₃	AI	$A_{1350-1510} / \Sigma A$
Asymmetrical stretch	CH ₃	ASI	$A_{2880-2945} / \Sigma A$
Symmetrical stretch	CH ₂	SSI	$A_{2840-2880} / \Sigma A$
$\Sigma A = A_{1010-1043} + A_{1678-1725} + A_{1535-1625} + A_{715-733} + A_{1350-1510} + A_{2880-2945} + A_{2840-2880}$			

3.4 Results and discussions

3.4.1 Basic and physical properties of RAP materials and RAP aggregates

Tableau 3.3 presents results for the RAP materials and RAP aggregates. The analysis of the results reveals that RAP-7 (0/20) registers the highest maximum specific gravity (G_{mm}), indicating it may have a lower bitumen content (P_b) and a higher aggregate density (G_{sb}). Conversely, RAP-3 (0/10) shows the lowest density, suggesting a higher bitumen content and a significant aggregate density within the mix.

Tableau 3.3 RAP materials and RAP aggregates properties

Properties	Unit	Test	RAP-1 (0/10)	RAP-2 (0/10)	RAP-3 (0/10)	RAP-4 (0/10)	RAP-5 (0/10)	RAP-6 (0/10)	RAP-7 (0/20)	RAP-8 (0/20)
$P_b^{(1)}$	%	3	5.35	5.93	5.39	4.58	5.25	4.32	4.41	4.37
G_{mm}	---	2	2.558	2.565	2.520	2.569	2.592	2.594	2.607	2.570
G_{sb}	---	2	2.793	2.817	2.759	2.777	2.799	2.772	2.778	2.756
G_{se}	---	2	2.802	2.842	2.766	2.785	2.839	2.792	2.813	2.766
Factor ⁽²⁾	%	---	-0.10	-0.11	-0.10	-0.09	-0.10	-0.08	-0.08	-0.08
$P_{b, \text{real}}^{(3)}$	%	---	5.45	6.05	5.49	4.67	5.34	4.40	4.49	4.45

⁽¹⁾ Ignition oven results without correction factor (P_b).

⁽²⁾ Correction factor = $P_b - \left(\frac{1/G_{mm} - 1/G_{se}}{1/G_b - 1/G_{se}} \times 100 \right)$ with a $G_b = 1.0079$ (specify gravity of bitumen).

⁽³⁾ $P_{b, \text{real}} = P_b - \text{correction factor}$.

G_{sb} range narrowly from 2.756 to 2.799, suggesting a relative consistency in the aggregate density across different RAP sources. Notably, RAP-7 and RAP-8 (0/20), display the highest and lowest G_{sb} values, respectively. This subtle divergence suggests minor differences that could be attributed to the various original pavement sources of the RAP material. The G_{se} values are close to G_{sb} values but consistently higher across all samples, indicating that when the asphalt film is considered, the aggregate becomes effectively denser. The small variance in these values across all RAP sources implies uniformity in the quality of the aggregates, even when they are coated with bitumen. The similar ranges of G_{sb} and G_{se} across the samples indicate that while there is a diversity in RAP sources, the physical properties of the aggregates in terms of density are fairly consistent.

The correction of the asphalt content (P_b) with the correction factor in Tableau 3.3 reveals the real content ($P_{b, \text{real}}$) ranging between 4.40% and 6.05%. RAP samples 0/10 (RAP-1 to RAP-6) average at 5.23% asphalt content, while RAP samples 0/20 (RAP-7 and RAP-8) average at 4.47%. This discrepancy suggests that RAP 0/20 samples may contain aggregates from deeper pavement layers, or they may have a higher specific surface area, which are typically less rich in bitumen.

Figure 3.2 delineates the gradation profiles of RAP materials before and after the bitumen extraction process. The black curves in Figure 2(a) exhibit a coarser gradation relative to the white curves in Figure 2(b), which is attributable to the agglomeration of particles by the presence of bitumen. Upon the extraction of bitumen in the ignition oven, as shown by the white curves, a notable increment of about 10% in particles passing the 0.080 mm sieve is observed, reflecting a finer gradation post-extraction. This shift towards finer gradation post-bitumen extraction suggests that the initial particle agglomerations were largely due to the binding effect of bitumen. Comparatively, the particle size distributions of the RAP aggregates post-ignition are more homogeneous, with a broader dispersion in their gradation slopes, indicative of the elimination of the bitumen's unifying effect. Notably, RAP-6 (0/10) appears finer than other RAP 0/10 samples, and the RAP 0/20 samples are the coarsest within the group.

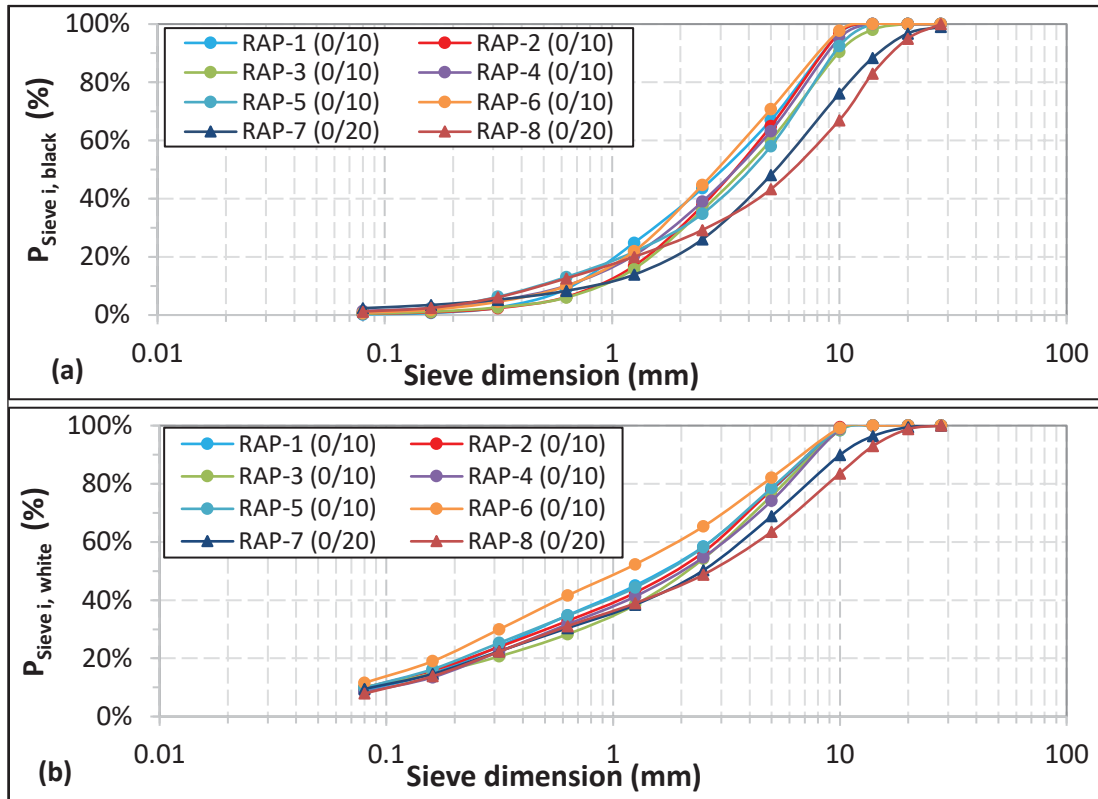


Figure 3.2 Particles size distribution: (a) Before ignition (RAP material: black curve) and, (b) After ignition (RAP aggregates, white curve)

Figure 3.3 further quantifies the impact of bitumen on particle size distribution by illustrating the differences (ΔP) between the proportions passing through sieves before (black) and after (white) bitumen extraction. The aggregated average for the RAP 0/10 group reveals the most pronounced change at the 0.630 mm sieve size, while for the RAP 0/20 group, the most significant variation occurs at the 2.5 mm sieve. Despite these variations, the general shape of the differential curves (ΔP) is analogous for both RAP groups, suggesting a consistent influence of bitumen across different gradations.

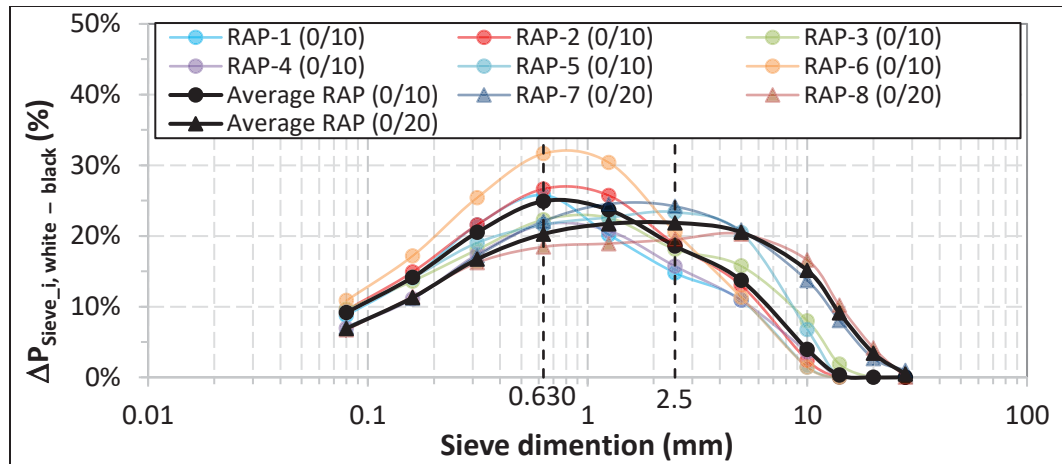


Figure 3.3 Impact of bitumen on particles size distribution

3.4.2 Characterization of RAP Bitumen from trichloroethylene extraction

Tableau 3.4 RAP bitumen properties shows results tests obtain on extracted binders from RAP. It is noted that no artificial aging, RTFOT and PAV tests not performed, has been done on the RAP binder before testing, because they are considered already oxidised.

3.4.2.1 Basic properties

The penetration tests indicate that most RAP bitumens are considerably hard at 25 °C, with RAP-5 (0/10 mm) being the softest, demonstrating highest penetration and hence a relatively softer consistency compared to others, which exhibit penetration values below 15 dmm, a typical indicator of a harder bitumen. This is particularly relevant in colder regions where softer bitumen is preferred to mitigate thermal cracking, similar to the properties of virgin PG 52S-34 and PG 64E-28 bitumens.

Tableau 3.4 RAP bitumen properties

Test (temp.)	Bitumen properties	RAP-1 (0/10)	RAP-2 (0/10)	RAP-3 (0/10)	RAP-4 (0/10)	RAP-5 (0/10)	RAP-6 (0/10)	RAP-7 (0/20)	RAP-8 (0/20)	PG 52S-34	PG 64E-28
Pen⁽¹⁾ (25°C)	Penetration (dmm)	15	13	13	13	35	12	20	26	159	74
BRV⁽¹⁾	$\eta_{135^\circ\text{C}}$ (Pa·s)	1.808	3.680	6.384	6.072	1.724	2.284	1.872	1.564	0.171	1.360
	$\eta_{165^\circ\text{C}}$ (Pa·s)	0.387	0.623	1.024	1.108	0.408	0.468	0.404	0.368	0.058	0.410
	T_{mixing} (°C)⁽²⁾	186	195	207	212	188	190	187	185	135	193
	T_{compaction} (°C)	173	182	193	197	174	177	174	172	124	176
DSR⁽¹⁾ (H; H+6°C)	T_{high} (°C)	88.5	96.3	98.7	100.5	84.0	89.0	82.9	83.4	52.7	75.2
MSCR^(3,5) (64°C)	Elastic recovery, R_{3.2} (%)	41.7	54.3	55.0	42.5	35.3	42.3	31.0	35.8	0.0	89.4
	Non-rec. Creep comp., J_{nr3.2} (kPa⁻¹)	0.266	0.089	0.055	0.051	0.499	0.251	0.499	0.469	3.18	0.11
	Compliance delta, J_{nr diff} (%)	19.6	16.5	38.1	9.1	68.4	14.4	65.5	24.4	9.3	74.6
	Traffic class (n: letter)	E	Fail	Fail	Fail	Fail	E	Fail	Fail	S	E
BBR^(4,5) (-12°C) (-18°C)	m(60s) (---)	0.345	0.309	0.329	0.290	0.290	0.315	0.411	0.371	0.917 ⁽⁶⁾	0.645 ⁽⁶⁾
	S(60s) (MPa)	123	220	144	330	330	154	61.3	85.5	48 ⁽⁶⁾	35 ⁽⁶⁾
	m(60s) (---)	0.293	0.257	0.286	0.238	0.259	0.273	0.344	0.321	0.630 ⁽⁶⁾	0.453 ⁽⁶⁾
	S(60s) (MPa)	253	441	262	597	240	304	137	176	116 ⁽⁶⁾	105 ⁽⁶⁾
	T_{low} (°C)	-27.2	-23.0	-26.1	-20.9	-24.5	-24.2	-31.9	-30.5	-34.9	-31.2
	ΔT_c (°C)⁽⁷⁾	-2.2	-1.7	-3.3	-0.2	-5.6	-3.7	-2.0	-1.9	+0.4	-1.0
DSR⁽⁵⁾+BBR	PG (H-L)	88-22	94-22	94-22	100-16	82-22	88-22	82-28	82-28	52-34	70-28
DSR⁽⁵⁾+BBR+MSCR	PG (Hn-L)	64E-22	none	none	none	none	64E-22	none	none	52S-34	64E-28

⁽¹⁾ On unaged bitumen.

⁽²⁾ In Quebec, T_{mixing} is limited at 168 ± 2 °C in the laboratory.

⁽³⁾ The tests were carried out of the rolling thin film oven test (RTFOT) residue but RAP bitumens have not been artificially aged.

⁽⁴⁾ The tests were carried out of RTFO and pressure aged vessel (PAV) residue but RAP bitumens have not been artificially aged.

⁽⁵⁾ For Montreal area and bituminous layers, the H and L specified are 64 and -28 °C. This is why the MSCR test was performed at H = 64 °C. The traffic level (n) specified is E and H for heavily loaded roads or S for lightly trafficked roads.

⁽⁶⁾ Tests are completed at -24 and -30 °C.

⁽⁷⁾ $\Delta T_c = T_{low, S(60)} - T_{low, m(60)}$

BRV results suggest that the RAP bitumens would require higher temperatures for mixing, with a range from 185 to 212 °C. RAP-8 (0/20) presents the lowest viscosity ($\eta_{135^\circ\text{C}}$ and $\eta_{165^\circ\text{C}}$), indicating potential ease of blending with virgin bitumen, while RAP-4 (0/10) exhibits the highest viscosity, potentially indicating resistance to blending. However, care must be

taken not to exceed the maximum mixing temperature threshold, such as the 170 °C limit in Quebec (MTMD, 2023), to prevent over-oxidation.

3.4.2.2 Performance grading (PG) properties

Despite all being sourced from the same region, the RAP samples exhibit a variety of Performance Grades (PG), which is likely attributable to differences in the levels of oxidation or the types of original bitumen utilized. Dynamic Shear Rheometer (DSR) tests show a wide range in the high-temperature performance grades (T_{high}) across the samples. However, each sample satisfies the H criterion (64 °C) specific to the Montreal area, indicating they all possess adequate resistance to rutting. Among these, RAP-4 (0/10) is identified as the most rigid, with a T_{high} of 100.5 °C, whereas RAP-7 (0/20) and RAP-8 (0/20) are characterized as the least rigid at elevated service temperatures.

The MSCR specifications were introduced in Québec in 2019. Therefore, the majority of the RAP analyzed in this study came from HMA produced before to the implementation of these standards. On MSCR results, all the bitumens show low non-recoverable creep compliance ($J_{\text{nr}3.2}$) and elastic recovery ($R_{3.2}$) on or under the limit (Figure 3.4). On $J_{\text{nr}3.2}$, all the results are below 0.5, which is an indication of a good rutting resistance. On Figure 4, the bitumen must be over the line to have an E letter (extreme traffic-level class of bitumen). If the $R_{3.2}$ is not high enough, it is considered a failure. Virgin PG 64E-28 bitumen shows the best result. Almost all the RAP's bitumen are on the limit to be considered as E, but $R_{3.2}$ is too low, except for RAP-1 (0/10) and RAP-6 (0/10). The compliance delta ($J_{\text{nr-diff}}$) must be under 75 % to be considered conform and this parameter is not used for E grade. The impact of a high incorporation of RAP in new asphalt mixes should have a positive impact on the rutting performance due to the low $J_{\text{nr}3.2}$ and the low $R_{3.2}$, the elastic recovery, can be solved by the virgin bitumen (using blending chart) in the case of a high RAP content. For example, the use of the PG 64E-28 can respect the Québec specification up to an RBR of 58 % with the RAP-7, which is the one with the lowest rutting performance.

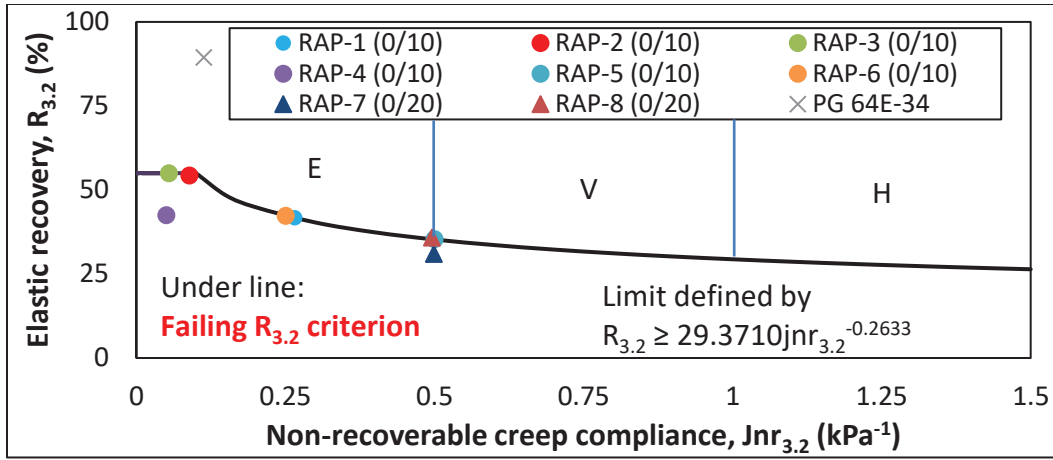


Figure 3.4 MSCR test result: relationships between the elastic recovery ($R_{3.2}$) and the non-recoverable creep compliance ($J_{nr,3.2}$) at the stress level of 3.2 kPa

BBR results show that the low critical temperature (T_{low}) of the RAP bitumens vary from -20.9°C for RAP-4 (0/10) to -31.9°C for RAP-7 (0/20). For all RAP bitumens, the T_{low} was found with the slope $m(60)$ criteria. All temperatures found with the $S(60)$ stiffness criterion were lower by 0.2°C for RAP-4 (0/10) to 5.6°C for RAP-5 (0/10) (ΔT_c values: Table 3). For the Montreal region, the T_{low} and the low temperature grading (L) must be under -28°C . So, the addition of RAP in new asphalt mixes necessarily results in a rise of T_{low} and lower the resistance to thermal cracking. Blending charts become more useful with the concentration of RAP to evaluate the new T_{low} of the blending bitumen. For example, 50 % of RBR (recycled bitumen ratio) could respect the Quebec specification with the use of the PG 52S-34 and the RAP-4 (0/10), which has the highest T_{low} value, which is the worst case for RAP bitumen.

Therefore, considering the test results of DSR, MSCR and BBR, it may become challenging to add RAP in large quantity without affecting the low temperature behaviour and elasticity if the virgin bitumen added to the mix is not modified from what is normally specified. From those results, T_{high} specification is not problematic, MSCR parameters values can be solved by using a polymer modified bitumen and T_{low} is the most critical parameters. Finally, the maximum RAP content of a blending of PG 64E-28 and RAP-4 (0/10) bitumen must have an RBR below 31 % with regard to all parameters.

3.4.2.3 Linear viscoelastic (LVE) properties

The complex shear modulus (G^*) test results of RAP bitumen's displayed on Figure 3.5. Tableau 3.5 shows the 2S2P1D parameters and WLF constants. For the sake of comparison, a virgin and standard PG 52S-34 bitumen and a virgin polymer modified PG 64E-28 bitumen were additionally tested. As shown in the Black space (Figure 3.5(a)), most bitumens exhibit a single thermo-rheologically simple curve, except for RAP-3 (0/10) and RAP-4 (0/10), alongside the polymer-modified bitumen, suggesting the presence of polymers in these RAP sources. Nevertheless, the scattering was not that important and the Time-Temperature Superposition Principle (TTSP) was applied for all bitumens. The results were successfully modelled on the Cole-Cole plan as shown in Figure 3.5(b), and the master curves of the norm of G^* ($|G^*|$) were built and shown in Figure 3.5(c). The 2S2P1D model was calibrated for all bitumens and simulates $|G^*|$ accurately (max. 10 % discrepancy) over up to high (8) orders of magnitude of stiffness. This range of measurement was made possible thanks to the three geometries of DSR specimens (25, 8 and 4 mm). The glassy moduli G_0 (or the high asymptotic value of modulus) of all bitumens does not vary a lot (from 1,040 to 1,220 MPa) i.e. the LVE behaviour at low temperature (T) and high frequency (f_r) are comparable (Table 5). The role of the 4 mm geometry plate needs to be stressed out, since it allows to perform measurements at very low temperatures. This geometry should be more broadly used, especially regarding low temperature performance studies. At high T and low f_r , the RAP bitumens are significantly less thermo-sensitive on $|G^*|$ when compared to the virgin PG 52S-34 bitumen, and are 2 to 3 orders of magnitude stiffer (Figure 3.5 (c)).

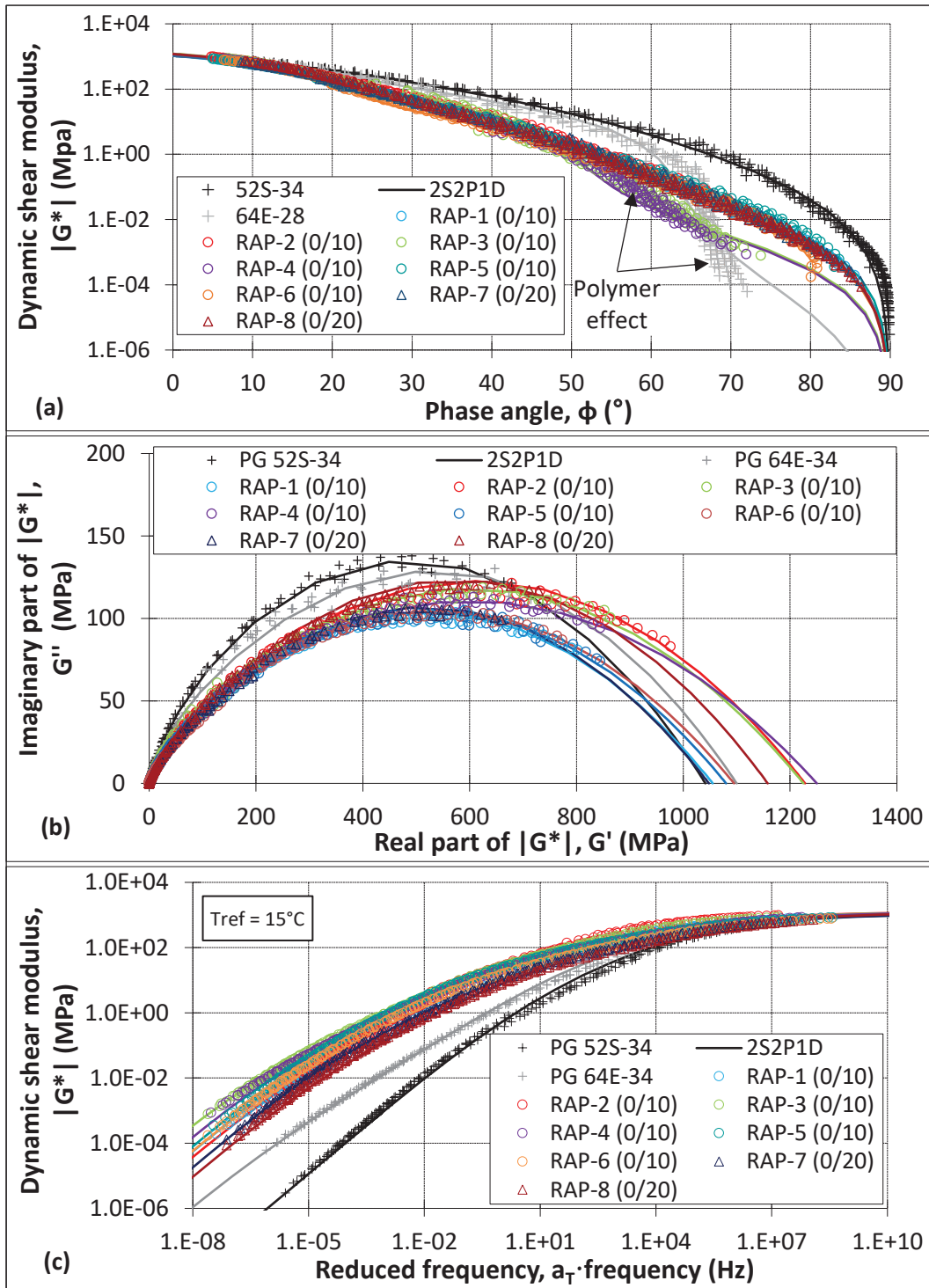


Figure 3.5 Complex shear modulus (G^*) test results (-30 to 82 °C; 0.1 to 10 Hz):
 (a) Black space with $|G^*|$ according to the ϕ , (b) Cole-Cole plan representing components of $|G^*|$ and, (c) Master curve of $|G^*|$ according to $a_T \cdot f_r$ for $T_{ref} = 15^\circ\text{C}$

Tableau 3.5 2S2P1D parameters and WLF constants

Bitumen Source	2S2P1D model							WLF law ⁽¹⁾ T _{ref} = 15°C	
	G_{00} (MPa)	G_0 (Mpa)	k (---)	h (---)	δ (---)	β (---)	τ_0 (s)	C_1 (---)	C_2 (°C)
Virgin 52S-34	0	1041	0.30	0.66	3.85	51	3,50 ^E -06	12.5	109.6
Virgin 64E-28	0	1100	0.29	0.70	5.74	994	2,00 ^E -05	20.7	191.0
RAP-1 (0/10)	0	1055	0.25	0.60	7.50	1132	8,00 ^E -04	33,4	273,0
RAP-2 (0/10)	0	1221	0.25	0.68	8.88	230	2,47 ^E -03	26,5	235,1
RAP-3 (0/10)	0	1225	0.24	0.58	7.30	6489	9,02 ^E -04	46,4	383,0
RAP-4 (0/10)	0	1250	0.22	0.56	5.09	8921	2,50 ^E -04	29,8	228,2
RAP-5 (0/10)	0	1080	0.24	0.60	8.89	1843	1,49 ^E -03	24,5	184,3
RAP-6 (0/10)	0	1095	0.24	0.60	8.81	1180	7,74 ^E -04	26,6	197,7
RAP-7 (0/20)	0	1048	0.25	0.59	7.70	1881	1,54 ^E -04	22,3	172,3
RAP-8 (0/20)	0	1158	0.27	0.63	8.90	1133	1,22 ^E -04	21,2	158,5
⁽¹⁾ Presented in detail in William, Landel & Ferry (1955)									

Hence, the effect of oxidation of RAP is clear at high T and low f_r (low a_T ·frequency for Figure 5(c)). A closer observation shows that the variations of $|G^*|$ between RAP sources spread over an order of magnitude at the higher T and low f_r (same area in Figure 5 (c)). In particular, the bitumens from RAP (0/20) sources appeared softer than RAP (0/10) sources. Figure 6 shows the GR values for the tested bitumens ($|G^*|$) as a function of ϕ at a frequency of 0.005 rad/sec. Both virgin bitumens perform very well on this criterion. PG 52S-34 is not shown in the Figure 6 because of its low $|G^*|$ and high ϕ , so it is the least sensitive to block cracking. Next, PG 64E-28 is second in terms of no-load cracking performance.

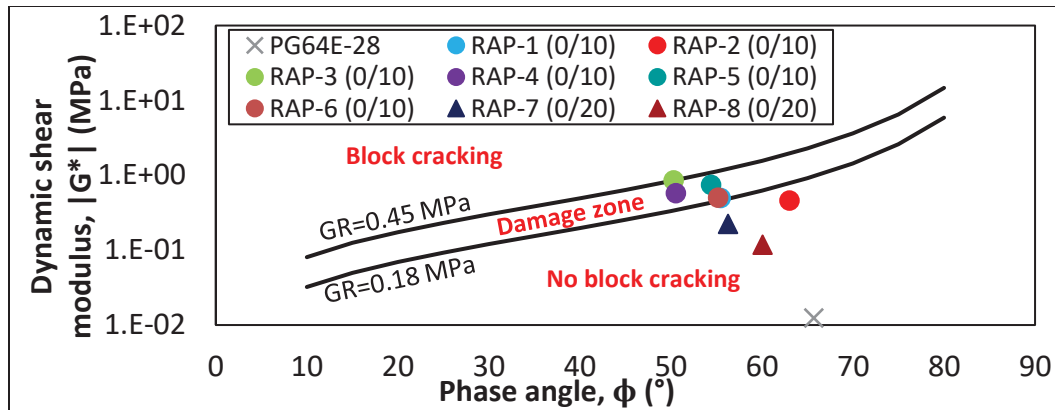


Figure 3.6 Characterization of cracking potential by the Glover-Rowe parameter within the Black-Space plot for nine bitumens

For the RAP bitumens, only three (3) sources of RAP are less than 0.18 MPa (RAP-8 (0/20), RAP-7 (0/20), and RAP-2 (0/10)), meaning they are less likely to crack. RAP-3 (0/10) has the highest value at the edge of the block cracking zone (GR=0.45). Using a higher amount of this RAP source in new asphalt mixtures would likely have a greater negative impact on crack resistance. The rest of the RAP bitumens are in the damage zone, where using a high amount of RAP in a new mix without changing the mixing method would affect cracking susceptibility.

3.4.2.4 FTIR absorbance results

The FTIR absorbance profiles of an extracted bitumen from RAP (RAP-1 0/10) and a virgin PG 64E-28 bitumen, as presented in Figure 3.7, display marked contrasts in their chemical compositions. Such variations are consistently noted across different samples of RAP bitumen, although for clarity, only one RAP sample is illustrated. Within the 2850-2950 cm^{-1} range, the RAP bitumen demonstrates sharp and pronounced peaks, suggesting a substantial concentration of aliphatic hydrocarbons (CH_2 and CH_3). The heightened sharpness and intensity of these peaks in the RAP sample may be attributed to the preservation or enhancement of aliphatic structures as a result of aging and oxidation. Additionally, around 1700 cm^{-1} , the carbonyl group ($\text{C}=\text{O}$) is more evident in the RAP sample compared to the virgin PG bitumen, indicating more extensive oxidation, which is a common sign of aging in bitumen (Nivitha & al., 2016).

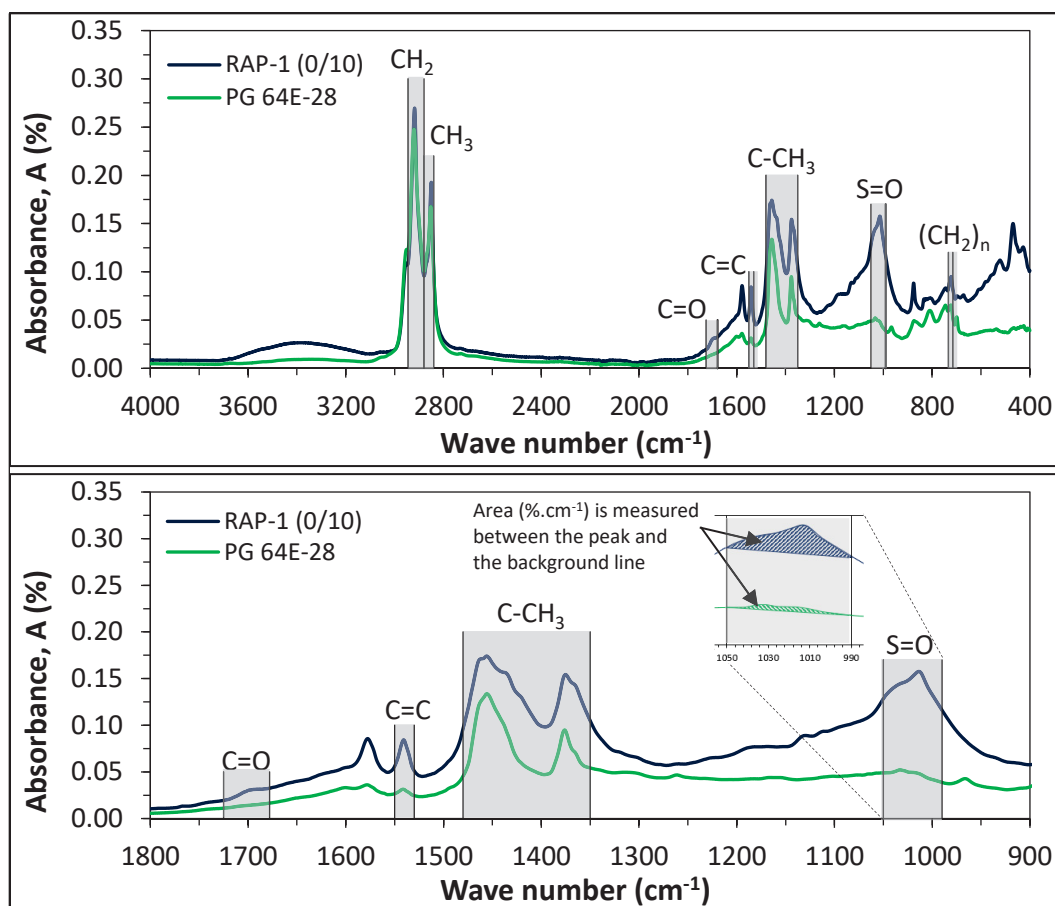


Figure 3.7 FTIR results: (a) Absorbance according to wave number from 4,000 to 400 cm^{-1} and, (b) Absorbance according to wave number from 1,800 to 1,000 cm^{-1}

The characteristic peak of the sulphoxide group (S=O) is more prominently observed around 1030 cm^{-1} , indicative of oxidized sulfur compounds that are commonly associated with the aging process in bitumen (Zhang & al., 2020). Absorbance peaks corresponding to aromatic compounds (C=C) near 1600 cm^{-1} and long aliphatic chains ((CH₂)_n) around 720 cm^{-1} are present in both the RAP and virgin samples. While these trends could be discerned from the figures, it's much more practical to conduct analysis and subsequent discussion on indices. Indeed, the normalization with all peaks considered allows to minimise the biases linked to experimental discrepancies (sample thickness, absolute level of absorbed energy). Hence, the calculated FTIR absorbance peak areas are simply listed in Tableau 3.6.

Tableau 3.6 Area value (%·cm⁻¹) of FTIR absorbance peaks

Type of bond	Bitumen source									
	RAP-1 0/10	RAP-2 0/10	RAP-3 0/10	RAP-4 0/10	RAP-5 0/10	RAP-6 0/10	RAP-7 0/20	RAP-8 0/20	Virgin 52S-34	Virgin 64E-28
S=O <i>A₉₉₀₋₁₀₅₀</i>	73.3	78.4	71.0	87.5	77.1	68.5	46.3	56.1	1.70	13.8
C=O <i>A₁₆₇₈₋₁₇₂₅</i>	3.33	1.07	4.41	3.58	5.25	2.96	7.40	7.81	0.77	0.28
C=C <i>A₁₅₃₀₋₁₅₅₀</i>	3.65	2.42	1.20	0.26	0.60	0.59	0.12	0.81	5.51	2.18
(CH₂)_n <i>A₇₁₅₋₇₃₃</i>	2.17	1.74	1.60	1.48	1.75	1.81	1.82	1.78	2.57	2.01
C-CH₃ <i>A₁₃₅₀₋₁₅₁₀</i>	616	677	615	610	624	620	559	604	455	456
CH₃ <i>A₂₈₈₀₋₂₉₄₅</i>	263	233	224	236	226	239	258	265	277	252
CH₂ <i>A₂₈₄₀₋₂₈₈₀</i>	51.7	45.8	44.4	47.0	43.4	46.4	49.4	49.9	53.1	49.3
ΣA	1012	1040	962	986	978	979	922	986	795	776

The FTIR results indicate that RAP bitumens have elevated levels of C-CH₃, C=O, and S=O, suggesting more pronounced aging and oxidation compared to virgin bitumen. Conversely, virgin bitumen exhibits greater C=C values, implying that the aging process diminishes aromatic compounds in RAP. Consistency in (CH₂)_n values across RAP samples contrasts with higher levels in virgin bitumen, hinting at reduced oxidation in the latter. Variability in CH₃ and CH₂ levels among RAP samples, which are generally above those in virgin bitumen, point to changes in the molecular structure and size due to aging.

Figure 3.8(a) shows the sulfoxide index (SI) and the symmetrical stretch index (SSI) across the bitumen sources. Elevated SI values in RAP bitumen (0.050 to 0.089) compare to virgin PG bitumens (0.002 to 0.018) indicate increased oxidation typically associated with aging. In fact, with its low standard deviation, SI was found out to indicate the clearest separation between RAP and virgin bitumens, out of all indices considered. RAP 0/10 samples (RAP-1 to RAP-6) have close SI values, suggesting a consistent aging level. RAP 0/20 samples (RAP-7 and RAP-8) have lower SI values, indicating to differential aging or exposure histories. SSI values vary among the samples, with RAP samples generally displaying lower values than virgin bitumens, which have higher SSI values, denoting a richer presence of methylene groups and less aging.

In Figure 3.8(b), the aromaticity index (ARI) and the carbonyl index (CI) are presented, revealing low ARI values across all samples and particularly lower values in RAP samples, likely due to the loss of aromatic compounds with aging. Even if the standard deviation can be significant, RAP samples consistently have higher CI values than virgin PG bitumens, indicating increased oxidation. RAP-7 and RAP-8 have the highest CI values, suggesting a higher degree of oxidation relative to this index, while the RAP 0/10 group shows more variation, supposedly reflective of different aging stages.

Figure 3.8(c) displays the long chain index (LCI) relating to $(CH_2)_n$ groups. The RAP samples have similar LCI values, indicating consistency in the presence of long aliphatic chains. Virgin PG bitumens, however, have higher LCI values. These higher values are expected as virgin bitumens have not undergone the aging process that often results in the breakdown of long hydrocarbon chains. (Zojaji & al., 2021).

Figure 3.8(d) compares the aliphaticity index (AI) and the asymmetrical stretch index (ASI) among various bitumen samples. RAP samples display elevated AI levels compared to the virgin samples, indicating a greater presence of aliphatic compounds, which is often the case with aged bitumen. Conversely, the virgin PG bitumens register the lowest AI values, suggesting they contain fewer aliphatic compounds due to less exposure to aging processes, yet they maintain significant aliphaticity indicative of unaged bitumen. Virgin bitumen also shows the highest ASI values, reflecting a higher concentration of methyl groups, which is a trait that tends to diminish with aging.

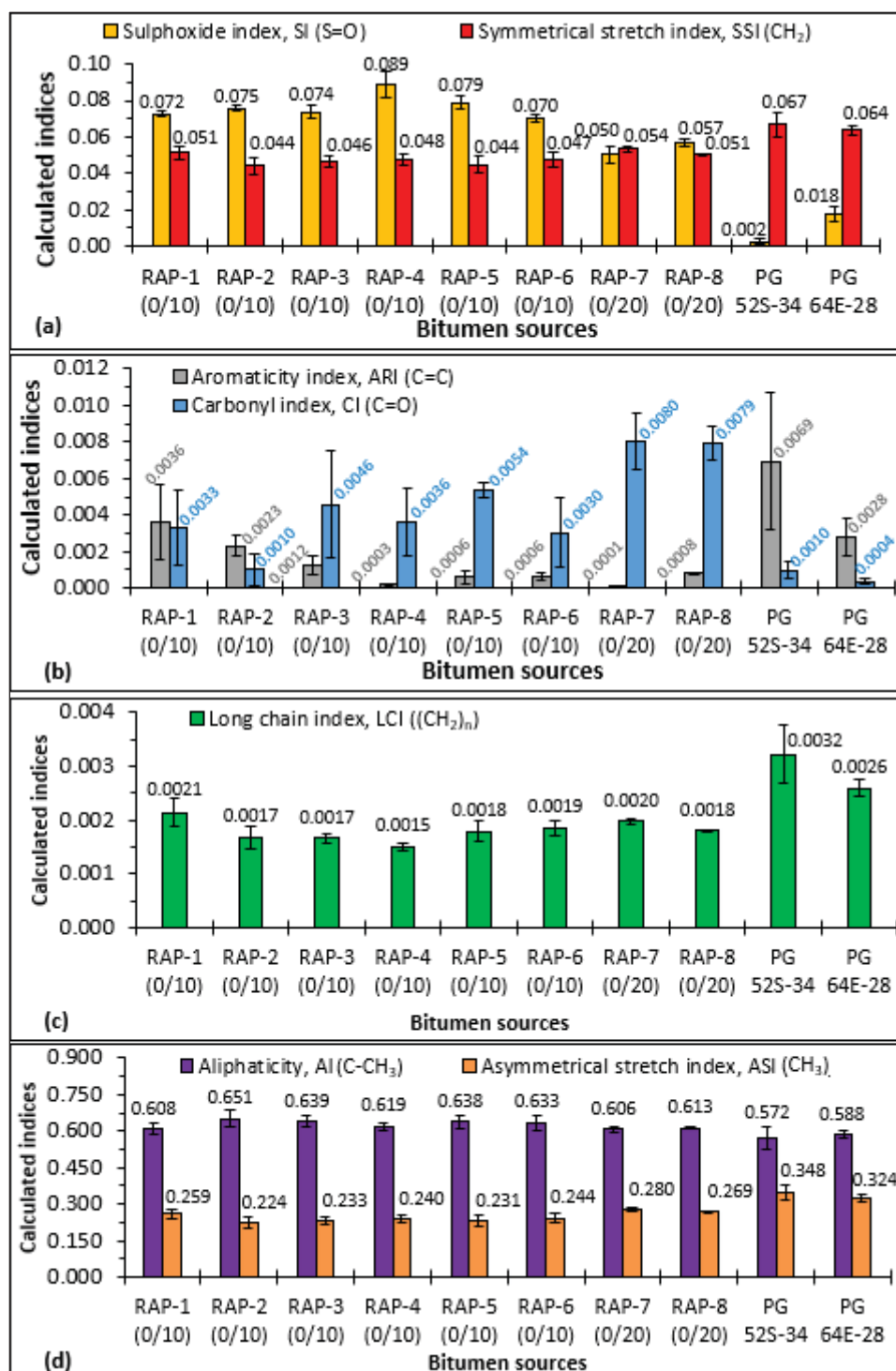


Figure 3.8 Indices determined from FTIR results: (a) Sulphoxide and symmetrical stretch, (b) Aromaticity and carbonyl, (c) Long chain and, (d) Aliphaticity and asymmetrical stretch (n=3)

Figure 3.9 underscores a correlation between the LCI and bitumen temperatures (T_{mixing} and T_{high}) and the gap (ΔT) between T_{high} and T_{low} ($T_{\text{high}} - T_{\text{low}}$). An increase in oxidation is paralleled by a rise in these temperatures, indicating the need for higher temperatures to achieve the desired viscosity during the mixing process. However, caution is warranted as higher T_{mixing} and T_{high} could be a feature of polymer-modified bitumens, not necessarily indicative of oxidation alone. These polymer-modified bitumens, identifiable by rheological testing such as the G^* test in the linear viscoelastic (LVE) domain, show distinct behaviours. For instance, polymer bitumens RAP-3 (0/10) and RAP-4 (0/10), along with virgin PG 64E-28, are excluded when plotting trend lines in Figure 3.9 due to their lower LCI relative to non-polymer bitumens. The variability seen in the Long Chain Index among RAP samples serves as evidence of their varied aging states and processing backgrounds. This variability, alongside the strong correlations observed, affirms the LCI crucial role in defining the thermal characteristics of bitumen (Jiang & al., 2021). Further research should be conducted to explore this correlation in greater detail.

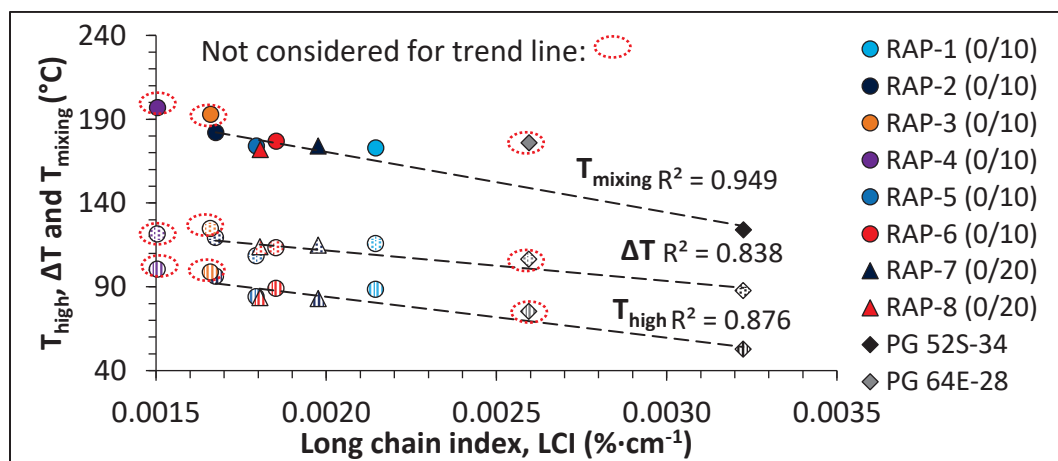


Figure 3.9 Bitumen properties (T_{mixing} , T_{high} and ΔT) in function of Long chain Index, LCI ($(\text{CH}_2)_n$)

Conclusively, FTIR analysis can effectively differentiate oxidized from non-oxidized bitumens. In particular, LCI and SI are crucial for assessing the thermal characteristics of bitumen, especially when combined together. Nevertheless, comprehensive performance

evaluation requires additional rheological assessments, including DSR, MSCR, and BBR tests for PG and the G^* test for LVE behaviour. It's important to note that for older RAP samples, the diversity in crude oil sources contributes to a range of bitumen compositions and chemistries, adding another layer of complexity to the analysis. Future studies should aim to refine the detection of polymer presence using FTIR and evaluate its performance implications on asphalt materials.

3.5 Conclusions

The research presented in this paper offers an in-depth comparison of eight sources of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) from the same geographic area within the Montreal region, located in the southwest of Quebec, Canada. Through extensive testing in three distinct phases on materials, aggregates, and bitumens, the study unveils the intrinsic variability within RAP sources, especially concerning bitumen properties (see Figure 3.1: Section 3.1).

Despite originating from a similar region where the limited performance grades (PG) are used, the bitumen extracted from RAP demonstrated a notable range of properties. RAP materials and aggregates exhibited consistent specific gravity and particle size distributions within the 0/10 and 0/20 categories, with the primary differentiating factor being the bitumen content (Tableau 3.3: Section 3.1.1). These findings underscore the importance of comprehensive characterization to appreciate the full spectrum of RAP material properties.

The extracted bitumen from RAP sources exhibited properties commonly associated with aging, such as a harder consistency and higher temperatures required for mixing and compaction, coupled with superior performance in high-temperature grading but poorer performance at low (Tableau 3.4: Section 3.1.4). The MSCR results indicated that most RAP bitumens approached the threshold of elastic recovery criteria, which aligns with expectations for aged bitumens. DSR test results, facilitated by the use of three different specimen geometries, revealed the viscoelastic behaviour of RAP bitumen across a broad range of temperatures and frequencies.

Interestingly, the G^* test results also suggested the presence of polymers in certain RAP bitumens, a finding further corroborated by discrepancies observed in the viscoelastic behaviour data. The application of the WLF and 2S2P1D models proved effective for accurately predicting the behaviour of RAP under varying conditions.

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) testing has demonstrated significant utility in assessing the aging and oxidation of bitumen. RAP samples showed elevated oxidation markers compared to virgin bitumen, especially with RAP-4 and RAP-5. The correlation between FTIR results and bitumen's thermal properties further highlights FTIR's role in predicting material performance. Indeed, the sulfoxide index (SI) and the long chain index (LCI), with their low standard deviation, emerged as the most distinct indicator for differentiating between RAP and virgin bitumens among all the indices evaluated. Overall, FTIR emerges as an effective technique for the quality analysis and characterization of bitumen through indices.

3.6 Future developments

The results indicate that a better RAP's bitumen characterisation is necessary to incorporate a higher amount of RAP material in a new asphalt mix; mostly the low temperature (L) in performance grading (PG). Future research following this study could explore a range of areas to deepen the understanding and improve the application of RAP in asphalt mixtures. One potential area is the development of advanced aging models for RAP bitumens to better predict their long-term behaviour and the effects of recycling. Researchers might also investigate how RAP bitumens can be modified with additives as rejuvenator to enhance their performance, allowing for greater RAP content in asphalt mixtures. More studies that track the real-world performance of pavements with varied RAP contents could help validate laboratory findings and refine predictive models. Alongside, comprehensive life cycle assessments could quantify the environmental benefits of using RAP, while economic analyses could weigh the cost savings against the performance of pavements with different RAP percentages. There's also a

need to understand the low-temperature properties of RAP bitumens, particularly in cold regions. This would aid in addressing potential pavement distresses caused by freeze-thaw cycles. Optimizing mix designs to incorporate RAP while maintaining or improving pavement performance characteristics, such as durability and resistance to deformation, is another significant research direction. Studying the compatibility of RAP bitumens with various virgin bitumens could lead to improved blending methods and a more homogeneous mix. Health and safety implications of working with RAP, including emissions during processing, should be examined to ensure safe work practices.

CHAPITRE 4

LABORATORY STUDY OF THE EFFECTS OF THE MIXER TYPE AND MIXING TIME ON THE VOLUMETRIC PROPERTIES AND PERFORMANCE OF A HMA WITH 30 PERCENT RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT

Marc-André Bérubé^a, Sébastien Lamothe^b, Kevin Bilodeau^c and Alan Carter^d

^{a,b,d} Department of Construction Engineering, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

^c Bauval Inc.
210 Bd De Montarville, Boucherville, Québec J4B 6T3

Article publié dans la revue « *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* », décembre 2022

4.1 Abstract

This study examined the effects of the laboratory mixer type and mixing time on a hot-mix asphalt (HMA) using three different types of mixers and four different mixing times. The asphalt mix used is a semi-open graded mix (ESG-10) with 30% reclaimed asphalt pavement (RAP), and a range of tests were conducted including bitumen extraction by ignition, particle size distribution, maximum specific gravity (G_{mm}), a SUPERPAVE gyratory compactor (SGC), bulk specific gravity (G_{mb}), indirect tensile stiffness modulus (ITSM), and indirect tensile strength (IDT). The statistical analysis of variance (ANOVA) was also applied to quantify the effect of mixer type and mixing time. The results indicated that both mixing type and time had a significant effect on the properties of the HMA (volumetric properties and compactability) and that the type of mixer used also affected the performance of the HMA (stiffness and cracking resistance), with some mixers producing asphalt mixes with better properties than others. The study ultimately demonstrated that it is possible to produce a mix that exhibits good performance and meets or does not meet the compactability specifications depending on the mixer type used.

4.2 Introduction

The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in new hot-mix asphalt (HMA) has become more common in recent years due to its potential to reduce waste and improve the sustainability of asphalt production (Tarsi, Tatanni & Sangiorgi, 2020). However, it is important to understand how RAP can affect the properties and performance of the resulting mix (Wang, Cheng, Sun, Sun & Liu, 2022, Bilodeau, 2012). The inclusion of RAP in new asphalt mixes can have several effects, both positive and negative. One potential benefit of using RAP is cost saving, as it is typically cheaper than using all-new materials. RAP can also provide environmental benefits by reducing the demand for new aggregate and bitumen materials, which can help conserve natural resources. In addition, RAP can improve the strength and durability of the asphalt mix. Despite those potential benefits of RAP, it is crucial to carefully evaluate the potential effects of adding RAP before including it in the asphalt mix, particularly its performance at low temperatures (Visintine, Khosla & Tayebali, 2013). The behavior of the asphalt mix may become more fragile at low temperatures when RAP is used (Li, Marasteanu, Williams & Clyne, 2008).

Studies on laboratory-produced mixtures have found that adding low amounts of RAP (15–20%) does not significantly affect the stiffness and strength of the mix at different temperatures (McDaniel, Soleymani, Anderson & Turner, 2002, McDaniel, Soleymani, & Slah, 2002, Haji, Sebaaly & Slah, 2002,). However, increasing the RAP content beyond 20% improves the mixture's stiffness and strength, resulting in increased resistance to rutting (Carter, Donovan, MacInnis & Strynadka, 2018). For higher RAP contents (>40%), the stiffness of the mix increases significantly at various temperatures when no changes to the virgin binder grade are made (Boriack, 2014, Maupin, Diefenderfer & Gillespie, 2008). The majority of Canadian agencies have established a range for the maximum RAP content allowed in new mixes, with the typical range being between 20% and 50%. The specific maximum RAP content in new mixes can vary depending on the province or territory, but on average, the RAP content used in new mixes is around 10% (Chow & Badra, 2018).

The evaluation of HMA typically involves a range of tests to assess the performance and quality of the mix. One common test is the indirect tensile strength (IDT) test, which measures the resistance of the asphalt mix to deform under indirect tension. This test can provide valuable information about the tensile strength and fatigue resistance of the mix, which are important factors in determining its performance in the field (Roque, Zhang & Sankar, 1999). From those data, it is possible to calculate the crack tolerance index (CT_{index}), which is a measure of the ability of asphalt pavement to resist the formation of cracks by considering the failure energy (G_f). Higher CT_{index} values indicate greater crack resistance and improved performance of the asphalt pavement. The CT_{index} is used to predict the crack formation in asphalt pavement and to inform the design and construction of the pavement (Radeef & al., 2021). G_f can be used to predict the behavior of asphalt pavement under various loading conditions and to design asphalt mixes that are suitable for different applications (Falchetto, Moon, Wang, Riccardi & Wistuba, 2018, Cominsky, Huber, Kennedy & Anderson, 1994). It is only one factor that needs to be considered when designing and evaluating asphalt pavement. Another commonly used test for HMA is the indirect tensile stiffness modulus (ITSM) test, which measures the stiffness of the asphalt mix. This test can provide valuable information about the elasticity of the mix, which is important for predicting its behavior under different loading and temperature conditions (Ramli, Pasra & Amiruddin, 2020).

In addition to IDT, ITSM, and CT_{index} , the compactability of the HMA mix can be evaluated using a shear gyratory compactor (SGC) test. This test involves compacting the mix to a given bulk specific gravity (G_{mb}) (Cominsky & al., 1994). This information can be used to assess the suitability of the mix for different applications and to optimize the compaction process in the field. Finally, the volumetric properties of the HMA, such as air voids (V_a) and effective bitumen content (V_{be}), can also be evaluated. These properties are important for predicting the mix's performance in the field and ensuring that it meets the specified requirements (Carter & al., 2018). The results of these tests can provide valuable insights into the quality and performance of the HMA mix and inform the development of more effective and sustainable asphalt production processes (Badeli, Solatiyan & Carter, 2019). Mixing time and the type of mixer can affect the properties of the mix (Hassan, Khan, Raaberg & Presti, 2015). Increasing

the mixing time by 1 to 2 min could increase the coating of the aggregates for a higher viscosity bitumen without causing any problems with mix performance (Yildirim, Solaimanian & Kennedy, 2000). There is, however, limited information available on the impact of the laboratory mixer type on the properties and performance of HMA with a high content of RAP. It could, however, be mentioned that higher mixing time or higher mixing energy could allow better reactivation of the RAP bitumen, which would result in different properties of the mixes.

The main objective of this study is to evaluate, in the laboratory, the effects of the type of mixer and the mixing time on the volumetric properties and the performance of a semi-open graded mix, commonly used for a surface/friction layer, but with a high RAP content (30%). Another goal of this study is to investigate the influence of the compactor on the air voids produced by different mixer types and mixing times by comparing the results obtained using the different methods. By investigating the effects of these factors on the mix, this study aims to provide valuable insights into the optimum mixing conditions for producing high-quality HMA with a high RAP content. This information can support the development of more effective and sustainable asphalt production processes.

4.3 Experimental Program

The experimental program described in Figure 4.1 used different mixers and mixing times to investigate the effects on the volumetric properties and performance (stiffness and cracking resistance) of HMA with a high content of RAP (30%). The mix design was initially developed using a Hobart (HB) tabletop mixer and a mixing time typically used for HMA (45 + 30 s) without RAP following the Quebec mix design method. This mix was selected to ensure that the resulting mix met the specifications for asphalt mixes in Quebec. The goal of the program was to evaluate the effects of the mixer type and mixing time for producing HMA with high RAP content. Detailed information about the materials, the methods, and the tests are presented in Section 4.4.

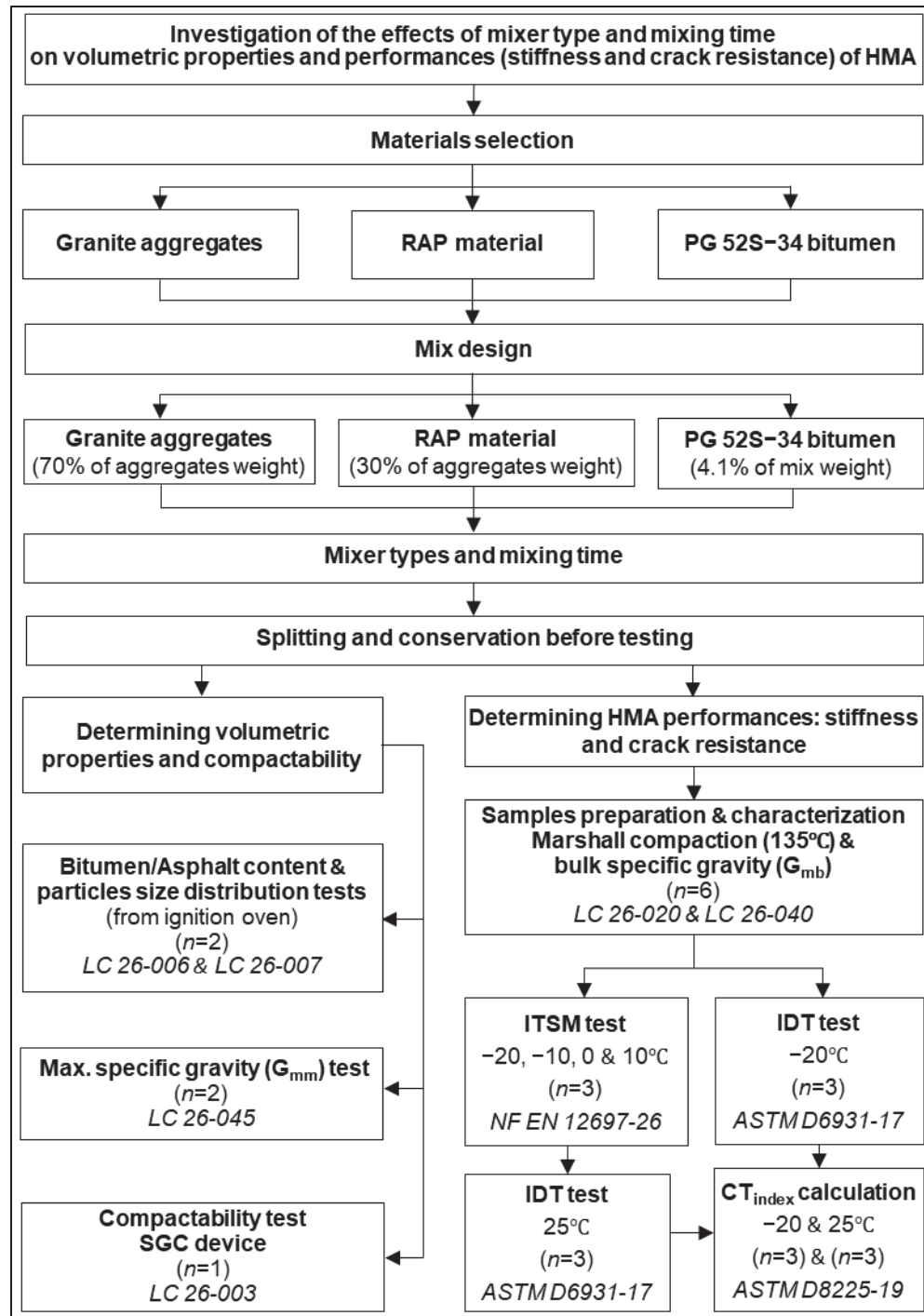


Figure 4.1 Organigram of the experimental program.

4.3.1 Materials

In this study, high resistance to abrasion, friability, and impact (MD and LA values) crushed granite virgin aggregates were used with a non-modified virgin bitumen (PG 52S-34), and RAP material from a single stockpile. The properties of the virgin aggregates are shown in Tableau 4.1. As is often the case, we do not have specific information on the type of RAP aggregate.

Tableau 4.1 Virgin aggregate properties

Test	Units	Quebec Test Method	Results	
			Coarse Aggregates (5-10 mm)	Fines Aggregates (0-5 mm)
Micro-Deval (MD)	%	LC 21-070 and LC 21-101	9	6
Los Angeles (LA)	%	LC 21-400	27	---
Micro-Deval (MD) modif	%	LC 21-080	---	23
Crushed particles	%	LC 21-100	100	100
Flakiness index	%	LC 21-265	12.8	---
Elongation index	%	LC 21-265	33.1	---
Bulk specific gravity (G_{sb})	---	LC 21-065 and LC 21-067	2.732	2.718
Absorption (abs)	%		0.44	0.23

The virgin bitumen and the RAP bitumen were characterized to determine their high (H) and low (L) temperature grading, as well as the appropriate mixing and compaction temperatures. The results of this characterization are shown in Tableau 4.2. The S value (the n value) of the virgin bitumen grade indicates a standard traffic-level resistance. It is important to mention that a soft, unmodified asphalt binder was selected to compensate for the hard RAP asphalt and to ensure that the combined bitumen would perform well at low temperatures.

Tableau 4.2 Reclaimed asphalt pavement (RAP) and virgin bitumen properties

Test	Units	Standard	Results	
			RAP Extracted Bitumen *	Virgin Bitumen
High-temperature grading (H)	°C	AASTHO T315	84.0	52.7
Low-temperature grading (L)	°C	AASTHO T313	-24.0	-34.9
Performance grade (PG Hn-L)	---	---	PG 82-22	PG 52S-34
Mixing temperature (T_{mix})	°C	AASTHO T316	174	136
Compaction temperature (T_{comp})	°C	AASTHO T316	161	125
* Extracted with trichloroethylene (TCE).				

Using the results obtained (Tableau 4.2), a blending chart was used to determine the mixing and compaction temperatures for the HMA. The higher viscosity of the RAP bitumen necessitated the setting of the mixing temperature (T_{mix}) at 145 °C and the compaction temperature (T_{comp}) at 135 °C. These temperatures were selected to ensure the optimal coating of aggregates and the performance of the HMA in the study. The properties of the RAP are shown in Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Reclaimed asphalt pavement (RAP) properties

Test	Units	Quebec Test Method	Results
Bitumen/asphalt content (AC)	%	LC 26-100	5.1
Maximum specific gravity (G_{mm})	---	LC 26-045	2.523
Water absorption (abs)	%	LC 21-065 and LC 21-067	0.0
Total specific surface area (SSA)	m ² /kg	LC 21-040	9.97
Aggregate bulk specific gravity (G_{sb})	---	LC 21-065 and LC 21-067	2.714

4.3.2 Preparations of Raw Materials, Mix Design, and HMA Selection

The virgin aggregates were sieved, washed, and weighed individually. The RAP material was dried in an oven at 40 °C for 3 days to take out the water without oxidizing it and then mechanically separated (aggregates splitter) following the LC 21-015 Quebec test method and a 30% portion by the total weight of aggregate was used for the mix. This is a common practice

in the industry (Al-Qadi, Aurangzeb, Carpenter, Pine & Trepanier, 2012, Yan, Zhang & Bahia, 2020). This resulted in a semi-open graded mix (ESG-10 mix), commonly used for surface/friction layer in the province of Quebec, with a nominal maximum aggregate size (NMAS) of 10 mm and a high content of RAP material (30 percent). The particle size distribution of the targeted mix is shown in Figure 4.2. The total bitumen content (or asphalt content: AC) of the mix is 5.6 percent of the total weight of the mixture. By taking into consideration that 100 percent of the RAP bitumen is mobilizable, a 4.1% bitumen addition (PG 52S-34) was used. The recycled binder ratio (RBR) corresponds to 27%, and this value was used to obtain the T_{mix} and T_{comp} in the blending chart (not shown here). The materials were carefully selected and prepared to ensure the quality and consistency of the resulting asphalt mix. This is essential for achieving accurate and reliable results from the study.

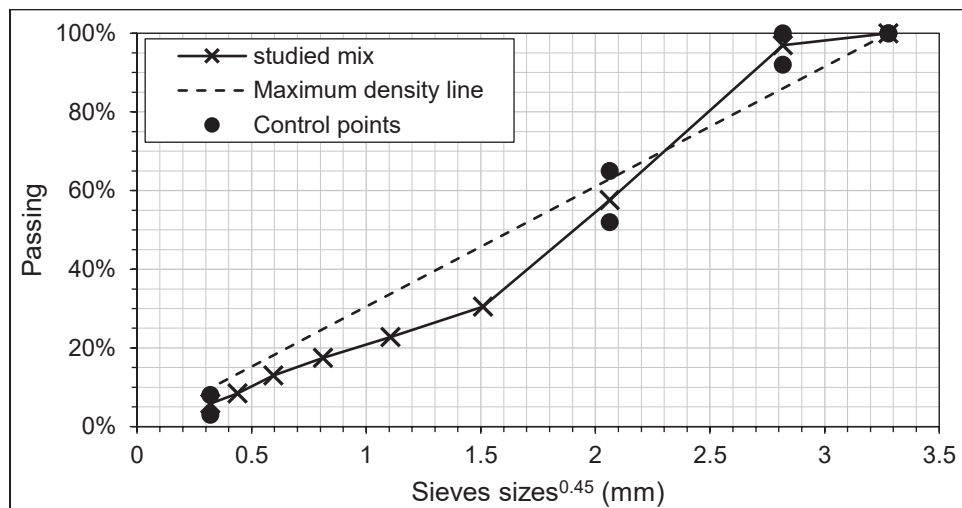


Figure 4.2 Particle size distribution of studied mix

4.3.3 Mixer types and mixing times

Three (3) different types of mixers were used to produce the HMA, as shown in Figure 4.3. The first type of mixer was a countertop mixer (HB: Hobart model A200), which is commonly used in laboratory settings. The second type of mixer was a laboratory pugmill twin-shaft mixer (PM: Wirtgen model WLM 30), which is typically used for producing cold mixes in a laboratory. This type of mixer is similar to those used in asphalt plants to produce HMA, which

means that the mix produced by this mixer may be more representative of the mixes typically used in the field. The third type of mixer used in the study was a thermoregulated mixer (TR: InfraTest model 30 l), which is a temperature and speed-controlled mixer. This type of mixer allows for precise control over the mixing conditions, which is important for producing high-quality asphalt mixes.

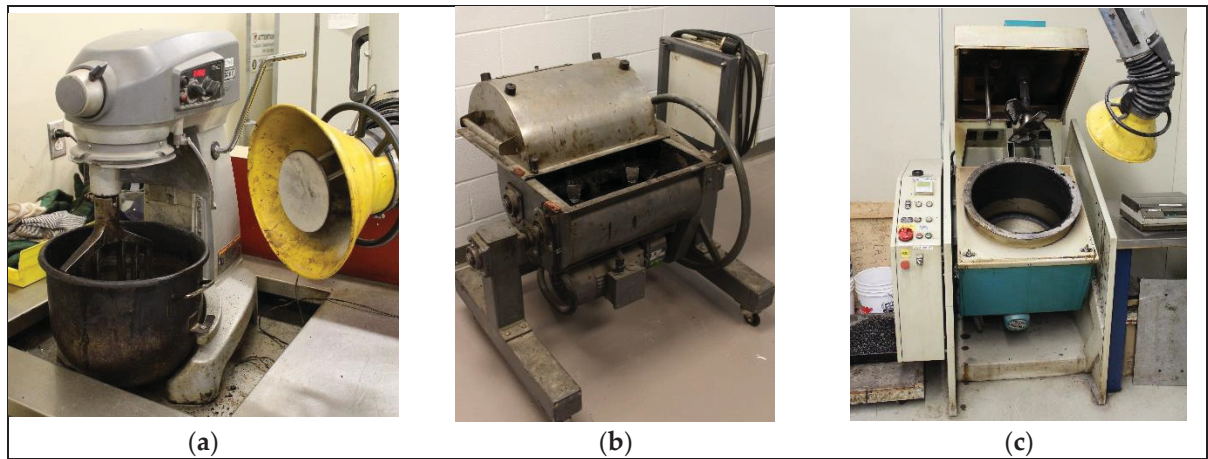


Figure 4.3 Mixers used for the study: (a) countertop mixer (HB); (b) pugmill mixer (PM); (c) thermoregulated mixer (TR)

The mixing time for each mixer type was selected based on the mixing time typically used for mixes without RAP in accordance with the LC 26-003 and LC 26-004 Quebec test methods. The first (1st) mixing time was the mixing time used for mixes with no RAP, and the second (2nd) mixing time was doubled for all subsequent mixes in order to cover a wide range of mixing times.

Tableau 4.4 shows the mixer types and mixing times (1st and 2nd) used in this study. With the combined mixer types (x3) and mixing times (x4), a total of twelve mixes (Tableau 4.4) with the same reference material were made in our laboratory.

Tableau 4.4 Conditioning of materials before mixing,
mixer type, and mixing time

Conditioning before Mixing			Mixer Type	Mixing Time		Mix
Aggregates	RAP	Bitumen	Model (ID)	1st (s)	2nd (s)	(ID)
185 °C	60 °C	145 °C	Countertop (Hobart: HB)	45	30	HB-1
					60	HB-2
					120	HB-3
					240	HB-4
185 °C	60 °C	145 °C	Pugmill (PM)	30	15	PM-1
					30	PM-2
					60	PM-3
					120	PM-4
145 °C	145 °C	145 °C	Thermoregulated (TR)	60	40	TR-1
					80	TR-2
					160	TR-3
					320	TR-4

4.3.4 Conditioning of Materials and Mixing Conditions

The conditioning of the raw materials depended on the type of mixer (Tableau 4). The aggregates for all mixers were heated in a draft oven the night before mixing. For the TR mixer, all components were at the T_{mix} (145 °C). For the HB and PM mixers, considering the loss of temperature during the mixing process, the aggregates were overheated at 185 °C to reach T_{mix} when combined with the RAP. To limit the oxidation of the RAP, the pre-dried RAP for all mixers was conditioned at 60 °C the night before mixing and then added in the HB and PM mixer at this temperature. The TR mixer was heated like the aggregates to the T_{mix} (145 °C) before mixing. Virgin bitumen was heated at 145 °C three (3) hours prior to mixing, and its temperature was checked. The temperature was monitored throughout the mixing process with an infrared thermometer.

4.3.5 Batch Size, Splitting, and Conservation before testing

For the TR and PM mixers, a single (1) batch of 20 kg was prepared. For the HB mixer, two (2) smaller batches of 10 kg each were combined to create a total of 20 kg. The resulting material was then mechanically divided into two (2) equal parts in accordance with the LC 21-010 Quebec test method. These portions were placed in two cardboard boxes and stored for seven (7) days before being reheated. The mixes were reheated at 115 °C and divided again to obtain the necessary weight for testing the volumetric properties and performance of the mixes under different mixing conditions.

4.3.6 Determining HMA Volumetric Properties and Compactability

The maximum specific gravity (G_{mm}) of the asphalt mixes was determined using the LC 26-045 Quebec test method, and a shear gyratory compactor (SGC) was used in accordance with the LC 26-003 Quebec test method, as depicted in Figure 4.4. These results were used to calculate the volumetric properties of the mixes, including the percentage of absorbed asphalt binder by mass (P_{ba}), the effective volume of asphalt binder (V_{be}), the voids in the mineral aggregate (VMA), and the voids filled with asphalt (VFA). These properties provide valuable information about the characteristics and performance of the asphalt mixes. The value obtained using the SGC test can be used to assess the compactability of the mixes and to determine the air void content (V_a) in the mixes. For the SGC test, the mixes are compacted at a temperature of 135 °C (T_{comp}). This information is useful for understanding the characteristics and performance of the asphalt mixes.



Figure 4.4 Determining HMA volumetric properties and compactability:
 (a) maximum specific gravity (Gmm) test;
 (b) shear gyratory compactor (SGC) device

4.3.7 Specimen Preparation and Determining HMA Performance (stiffness and crack resistance)

In order to carry out the tests characterizing the performance of the mixes, it is necessary to prepare specimens. For this purpose, a second compaction method was performed using the Marshall hammer (40 blows per side and six (6) specimens per mix with a diameter of 100 mm and a thickness of 63 ± 5 mm) according to the LC 26-020 Quebec test method for all 12 mixes. Again, the mixes were compacted at a temperature of 135°C (T_{comp}). Forty blows, instead of sixty as specified by the test method, were chosen to have a higher air void content (V_a) for Marshall specimens and to make them as comparable as possible to SGC specimens. In particular, this value of 40 blows is not arbitrary and is normally used when the moisture resistance of the asphalt mix (specimens) is to be checked, as indicated in the Quebec test method LC 26-001. The hydrostatic weighing was used to determine the bulk specific gravity (G_{mb}) and air voids (V_a) of each specimen following the LC 26-045 Quebec test method, as shown in Figure 4.5. No additional aging was performed on the specimens before testing. For all performance evaluations, the statistical analysis of variance (ANOVA) was also applied to quantify the effect of mixer type and mixing time.

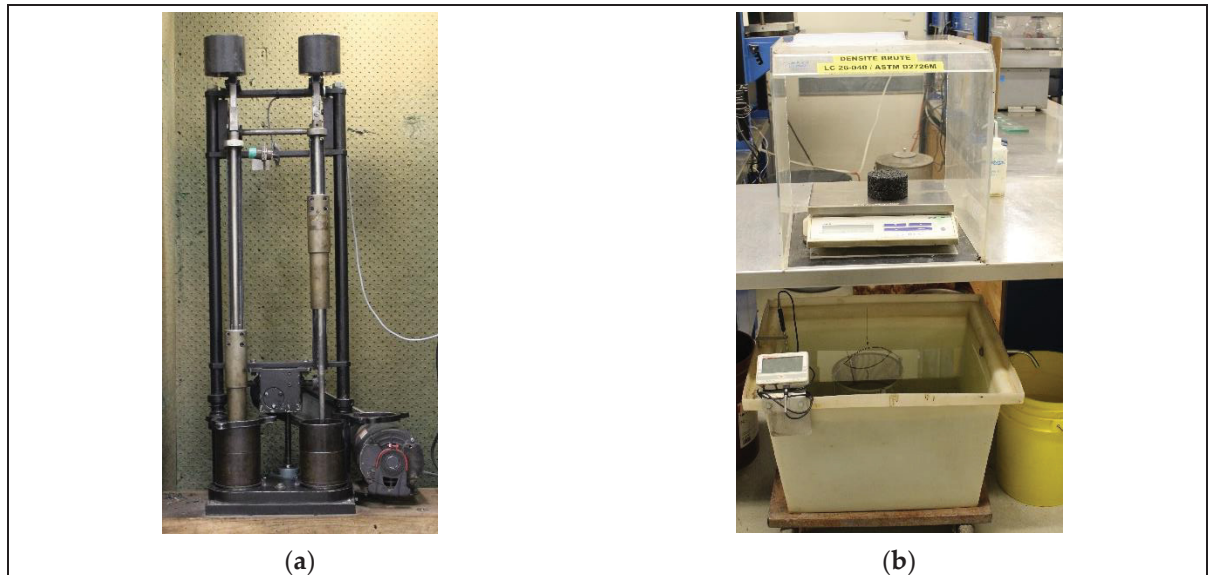


Figure 4.5 Marshall method: (a) compaction of the specimens;
(b) hydrostatic weighing

Of the six specimens, three (3) Marshall specimens with similar air voids (V_a) for each mix were selected for the indirect tensile stiffness modulus (ITSM) test, which is based on the NF EN 12697-26 standard. This test was chosen because it is a non-destructive test, and the tested specimens can be kept for the indirect tensile strength (IDT) test. For the ISTM test, four (4) testing temperatures were selected for each mix (-20 , -10 , 0 , and 10 °C). During the test, 10 cycles of compression tension were applied and the horizontal strain was recorded. The ITSM test is a method for determining the tensile strength and elastic modulus of asphalt materials.

The IDT tests were conducted according to the ASTM D6931-17 standard at 25 °C and -20 °C, with three (3) specimens tested for each temperature for a total of six (6) specimens for this test. To achieve those tests with precision, a hydraulic press with a temperature control chamber was used. Figure 4.6 presents the ITSM and ITD devices.

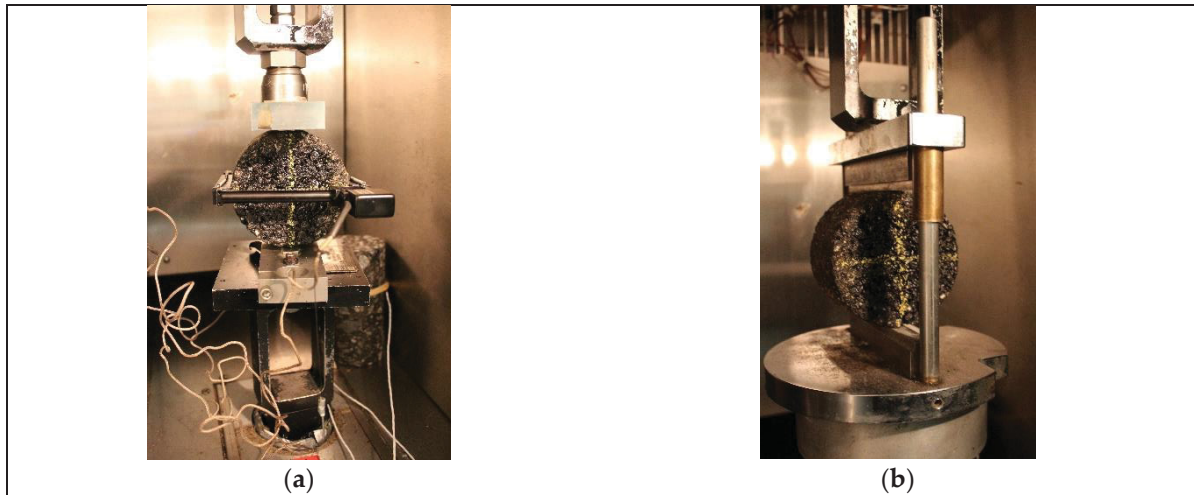


Figure 4.6 Asphalt performance evaluation: (a) ITSM device; (b) IDT device

From the IDT results, it was possible to evaluate the crack tolerance index (CT_{index}) following the ASTM D8225-19 standard. According to the ASTM D8225-19 standard, it is possible to calculate the work of failure (W_f) and the failure energy (G_f). W_f is a measure of the energy required to cause a material to break or fail. It is represented by the area under the curve in the IDT test. G_f is a measure of the amount of energy required to break a specimen, considering its dimensions (thickness and diameter). These values can be used to evaluate the performance and durability of asphalt mixes in different applications, and to optimize their use in construction and paving projects. They provide valuable information about the strength and resilience of asphalt under different conditions and can be used to select the most suitable asphalt mix for a given project.

4.4 Results and Analysis

4.4.1 HMA Volumetric Properties and Compactability

The volumetric properties evaluated are the G_{mm} , the percentage of absorbed asphalt bitumen by mass (P_{ba}), the effective volume of asphalt binder (V_{be}), the voids in the mineral aggregate (VMA), and the voids filled with asphalt (VFA). With the SGC results at N_{design} (80 gyrations for ESG-10 mix), it was possible to evaluate the specific bulk gravity (G_{mb}) of the HMA and

after, to determine the V_a , V_{be} , VMA, and VFA values. Tableau 4.5 shows the volumetric properties.

Tableau 4.5 Volumetric properties

Mix (ID)	G_{mm} ($n = 2$) (---)	P_{ba} ($n = 2$) (%)	G_{mb}^1 ($n = 1$) (---)	V_a ($n = 1$) (%)	V_{be}^2 ($n = 2$) (%)	VMA ($n = 2$) (%)	VFA ($n = 2$) (%)
TR-1	2.524	0.41	2.325	7.9	12.0	19.9	60.3
TR-2	2.514	0.24	2.357	6.2	12.6	18.8	66.8
TR-3	2.519	0.33	2.349	6.7	12.4	19.1	64.7
TR-4	2.522	0.38	2.365	6.2	12.3	18.5	66.4
HB-1	2.526	0.44	2.381	5.7	12.3	18.0	68.2
HB-2	2.509	0.13	2.395	4.5	13.0	17.5	74.1
HB-3	2.518	0.29	2.406	4.5	12.6	17.1	73.9
HB-4	2.514	0.23	2.429	3.4	12.9	16.3	79.1
PM-1	2.530	0.54	2.299	9.1	11.7	20.8	56.1
PM-2	2.525	0.39	2.353	6.8	12.1	18.9	64.2
PM-3	2.521	0.32	2.349	6.8	12.3	19.0	64.3
PM-4	2.515	0.32	2.383	5.3	12.7	18.0	70.8
¹ G_{mb} at N_{design} (80 gyrations) from SGC results. ² V_{be} value was determined with the air voids (V_a) value at N_{design} .							

The G_{mm} value of a mix can vary depending on the type of mixer used and the mixing time. In this test, the G_{mm} values ranged from 2.509 to 2.530, with the highest values occurring at the first mixing time for each mixer. The G_{mm} is affected by the amount of asphalt bitumen absorbed by the aggregates in the mix. In principle, higher absorption leads to a higher G_{mm} value (Carter & al., 2018). The absorbed bitumen could be an indicator that the bitumen from the RAP is more activated with the mixing time and its mobilization is increased. However, it is possible that there is something else that explains this, requiring further analysis of results. In this test, the maximum acceptable difference between two tests performed by the same operator is 0.011, which is higher than the difference of all TR mixes. HB mixes have a 0.017 difference and PM mixes have 0.015, which remains low.

The V_{be} value, a mix design criterion used in Quebec, is aimed at being at $12.2 \pm 0.1\%$. For all mixes, the first mixing time has the lowest V_{be} value, which increases with subsequent mixing times. For TR and HB mixes, the second mixing time (TR-2 and HB-2) has the highest V_{be} value, which then stabilizes for the next mixing time. For PM mixes, V_{be} continues to increase with mixing time (PM-1 to PM-4).

VMA are the air-void spaces between the aggregates, including the space filled with the bitumen of the compacted mix. For all mixes, the VMA is over 15%, indicating a good mix, and it is not really affected by the mixing time. It slightly decreases with mixing time (1 to 4). VFA is the percentage of VMA containing bitumen. VFA rise with the increase in the mixing time. The VFA value increases with mixing time, with the least impact on TR mixes and the most impact on PM mixes. It is affected by the fine particles (80 μm sieve-passing), as shown in Section 4.4.1.2.

4.4.1.1 Air Voids Evaluation

Tableau 4.6 shows the air voids (V_a) with the SGC at 10 (N_{ini}), 60, 80 (N_{design}), 100, 120, and 200 (N_{max}) gyrations and the Quebec specifications for the ESG-10 mix. It is possible to observe in this table that the mixer type and mixing time affect the compactability of the mixes and have an impact on the mixes meeting the targeted specification. Mix design was conducted at first with the HB-1 and it respects all of the Quebec specifications. In all the other HB mixes, the voids are too low at 200 gyrations (shown in red in the table). In addition, for the HB-4 mix, the voids are too low at N_{design} .

Tableau 4.6 Air voids (V_a) obtained from the SGC test

Mix (ID)	V_a at Number of Gyration (%) ($n = 1$)					
	10	60	80	100	120	200
TR-1	16.5	9.0	7.9	7.2	6.6	5.0
TR-2	15.1	7.4	6.2	5.5	4.8	3.4
TR-3	15.5	7.8	6.7	5.9	5.4	3.8
TR-4	15.1	7.3	6.2	5.4	4.8	3.4
HB-1	14.4	6.8	5.7	4.9	4.4	2.9
HB-2	13.5	5.6	4.5	3.7	3.1	1.7
HB-3	13.5	5.5	4.5	3.7	3.1	1.8
HB-4	12.4	4.4	3.4	2.7	2.2	1.2
PM-1	17.6	10.2	9.1	8.4	7.8	6.3
PM-2	15.6	7.9	6.8	6.0	5.4	3.9
PM-3	15.5	7.8	6.8	6.0	5.4	3.9
PM-4	14.1	6.3	5.3	4.5	3.9	2.5
N_{name} Spec.	N_{ini} ≥ 11.0	---	N_{design} 7.0–4.0	---	---	N_{max} ≥ 2.0

For the TR-1 and PM-1 mixes, the voids at N_{design} are too high and do not meet the Quebec specifications (Tableau 4.6). However, mixing for longer periods can help to reduce these voids. Mixing for a proper amount of time can also help to activate the RAP bitumen and improve the compactability of the mixes. In addition, longer mixing can fracture and wear the aggregates and produce finer particles that fill and reduce air voids. A strong correlation between the V_{be} and VFA in the function of the air voids at N_{design} can be observed in Figure 4.7. Although the variation in VFA is higher, it follows the trend with the voids obtained at N_{design} .

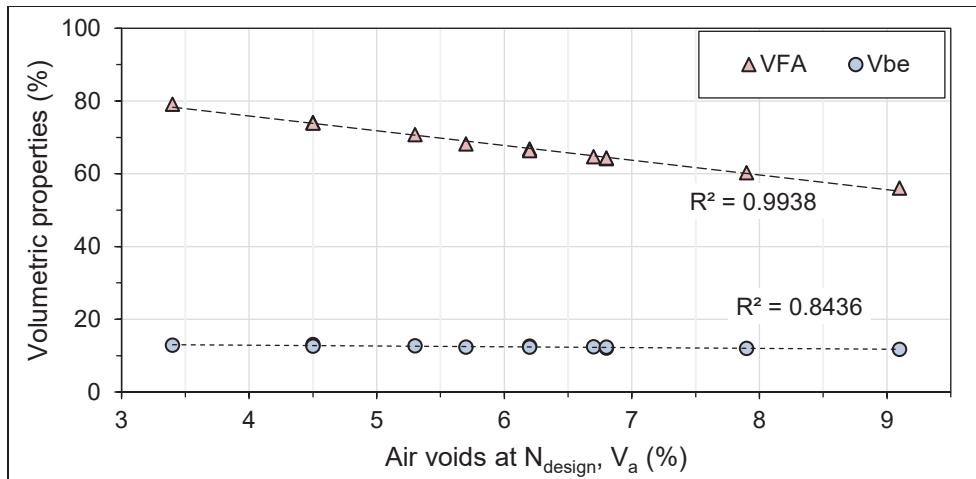


Figure 4.7 Effective volume of asphalt binder (V_{be}) and voids filled with asphalt (VFA) in the function of the air voids (V_a) at N_{design}

Figure 4.8 shows the air voids obtained with Marshall compaction. Even though 40 blows were used instead of 60 to compact the Marshall specimens, Figure 4.8 shows that the voids are lower with Marshall compaction (M), around two percent lower than the air voids at N_{design} with SGC compaction, which is commonly observed in asphalt specimens.

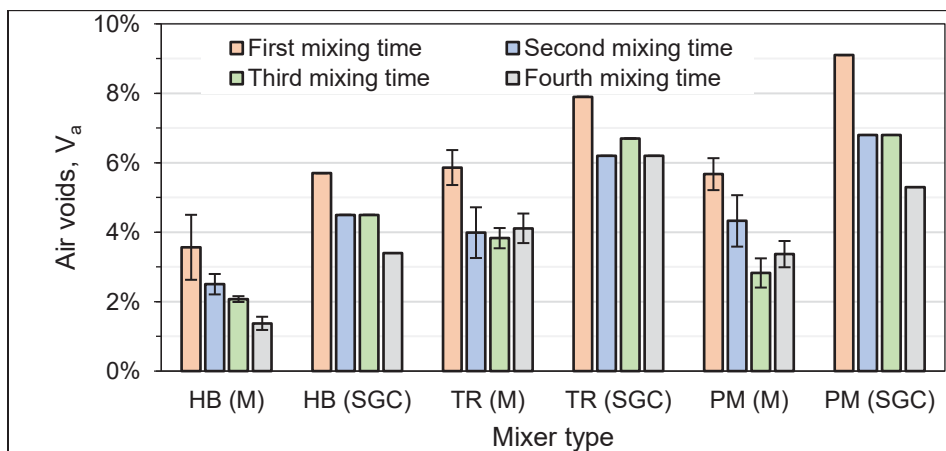


Figure 4.8 Voids with Marshall compaction (M) after 40 blows each side ($n = 6$) and shear gyratory compaction (SGC) at N_{design} ($n = 1$)

SGC and Marshall compaction do not show the same trend, but some similarities can be observed. For all the mixes, the voids are the highest at the first mixing time and decrease with

the increase in the mixing time. For the HB mixer, Marshall compaction affects the voids linearly with the mixing time, but a certain stabilization is observed in the SGC compaction. TR mixes show the same void variability for both compaction methods. For PM mixes, the effect of mixing on voids varies depending on the compaction method used. When using SGC compaction, voids decrease with increasing mixing time, with a stabilization occurring between the second and third mixing times. However, when using Marshall compaction, voids decrease with increasing mixing time for the first three mixing times, but then increase for the fourth mixing time. Finally, it is shown that the laboratory mixer type and mixing time should influence the mix proportion of the aggregates to meet the void SGC specifications.

4.4.1.2 Bitumen Content and Gradation

Tableau 4.7 presents the asphalt content (AC) and particle size distribution of various mixes that were tested in an ignition oven. These mixes were all composed of the same aggregate size, RAP, and bitumen content, allowing for comparison between the different mixes. The previous results indicate that the virgin aggregates used in these mixes do not require a correction factor with the use of an ignition oven due to their good intrinsic properties (as shown in Table 4.1).

Tableau 4.7 Bitumen content and particle size distribution from ignition

Mix (ID)	AC ¹ (%) (<i>n</i> = 2)	Particle Size Distribution (<i>n</i> = 2)								
		(mm)					(μm)			
		14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80
TR-1	5.37	100	97	57	30	21	17	13	9	6.1
TR-2	5.45	100	97	56	30	21	17	13	9	6.4
TR-3	5.41	100	96	57	30	21	17	13	9	6.5
TR-4	5.42	100	97	57	29	21	17	13	9	6.5
HB-1	5.50	100	96	58	31	22	18	13	10	6.9
HB-2	5.44	100	97	57	31	22	17	13	10	6.9
HB-3	5.48	100	97	58	32	23	19	15	11	7.7
HB-4	5.42	100	97	57	31	22	18	14	11	8.1
PM-1	5.45	100	96	53	27	19	15	11	8	5.7
PM-2	5.41	100	96	56	30	22	18	13	10	7.0
PM-3	5.42	100	96	58	31	23	18	14	10	7.1
PM-4	5.44	100	97	58	32	23	18	14	10	7.3
REF	5.60	100	97	58	30	23	18	13	8	5.8
Spec.	---	100	100	65	46.1 ²	36.7 ²	26.8 ²	18.1 ²	---	7
		100	92	52	46.1 ²	30.7 ²	22.8 ²	18.1 ²	---	4
¹ Asphalt content based on V_{be} = 12.2%. ² It is recommended to pass outside of this restrictive area										

The data in Tableau 4.7 show that the bitumen content (AC) of all the mixes tested is lower than the mix design where the bitumen has been extracted with trichloroethylene (TCE). This difference, approximately 0.2 percent, suggests that a correction fac-tor is necessary when using the ignition oven with this mix containing 30% RAP. The particle size distributions for most of the sieves are similar, but the 80μm sieve shows significant variation between the mixes due to the attrition of the aggregates during the mixing process. The TR mixes have less attrition, possibly due to their lower mixing energy, while the HB and PM mixes have higher attrition and a higher content of 80μm sieve-passing particles, possibly due to their more aggressive mixing energy. The last two mixing times (three and four) for these mixers (HB

and PM) types are critical and do not meet the ESG-10 specifications. It may be beneficial to aim for a lower 80 μ m content when using more RAP to allow a longer mixing time.

Figure 4.9 shows the relation between the recorded voids and the average air voids obtained from SGC and Marshall compaction. As mixing time increases, the percent passing through the 80 μ m sieve also increases. This could be the reason that the voids vary for each mix, because fine particles fill the voids. On average, the voids decrease with the increase in the 80 μ m sieve content. Special attention to the mixing conditions in the laboratory and in asphalt plants is required to produce the right mix formula.

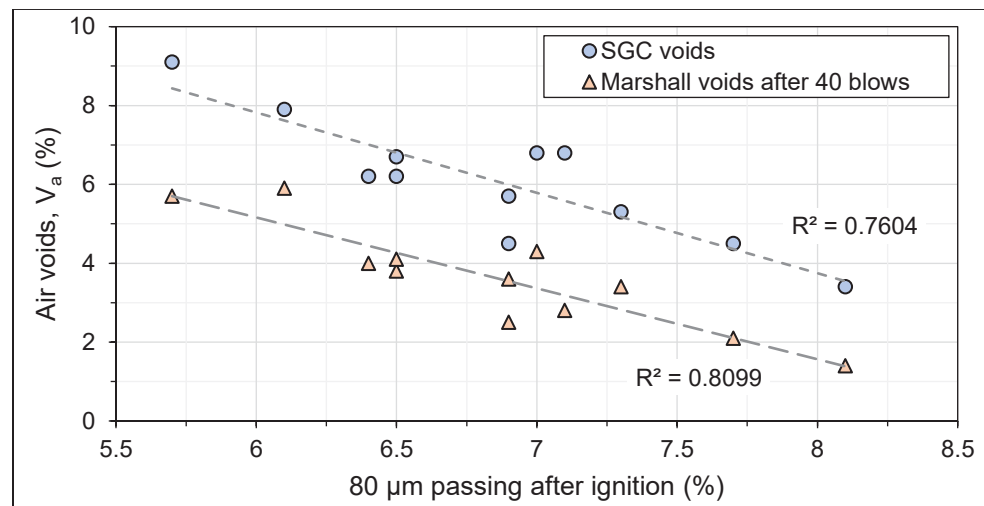


Figure 4.9 Shear gyratory compactor SGC voids ($n = 1$) and Marshall voids after 40 blows ($n = 6$) in the function of 80 μ m sieve-passing after mixing and an ignition test

4.4.2 HMA Performance

4.4.2.1 Indirect Tensile Strength Modulus (ITSM)

Tableau 4.8 shows the ITSM results at -20 , -10 , 0 , and 10 $^{\circ}\text{C}$. The table shows that, as expected, the ITSM results vary with temperature, with the mix becoming stiffer as the temperature decreases. The repeatability of the tests is good, as indicated by the average standard deviation of 3.4%. The maximum variation was found at 0 $^{\circ}\text{C}$ for the PM-2 mix, with

7.7%, while the lowest variation was found at -20°C for the PM-1 mix, at 0.3%. All the results fall within the maximum difference specified by the NF EN 12697-26 standard, which is 10 percent. The average standard deviation (σ) between all mix types and time is 1319, 1308, 482, and 354 for -20 , -10 , 0 , and 10°C , which remained in the 10 percent maximum difference of the standard.

Tableau 4.8 ITSM results at -20 , -10 , 0 , and 10°C

Mix		Testing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)							
		-20 ($n = 3$)		-10 ($n = 3$)		0 ($n = 3$)		10 ($n = 3$)	
		E'	σ	E'	σ	E'	σ	E'	σ
ITSM (MPa)	PM-1	30,821	92	20,009	372	10,598	270	3935	91
	PM-2	31,883	197	20,421	713	11,180	864	4374	51
	PM-3	32,000	546	21,004	418	11,139	730	4215	53
	PM-4	33,000	998	22,830	1531	11,846	757	4539	287
	HB-1	29,765	1399	20,489	736	10,630	91	4030	6
	HB-2	31,221	920	22,444	1410	11,419	188	4368	162
	HB-3	32,827	846	22,456	1326	11,260	140	4313	142
	HB-4	31,397	957	23,046	1211	11,915	94	4439	86
	TR-1	28,576	1113	19,959	236	11,255	255	4436	106
	TR-2	29,887	834	20,655	227	11,585	247	4528	155
	TR-3	31,562	1130	20,395	115	11,212	585	4592	308
	TR-4	32,304	2262	23,493	1708	12,211	310	5356	72

Overall, the stiffness of the PM, HB, and TR mixes increased as the mixing time increased. The stiffness of PM-2, PM-3, and PM-4 increased on average by 5.5%, 5.2%, and 12.1%, respectively. PM-2 and PM-3 showed similar behavior, despite having a 2.1% variance in voids. The stiffness increase in PM-4 may be due to its lower void percentage (2.0% lower than PM-1). As mentioned earlier, increasing the mixing time of the HMA affects its particle

size distribution, increases binder oxidation, and activates more RAP bitumen, leading to an increase in stiffness.

The stiffness of HB-2, HB-3, and HB-4 increased with mixing time. HB-2 and HB-3 showed similar behavior with similar voids at temperatures between -10°C and 10°C (7.6% and 8.2% increase compared to HB-1). The lower voids in HB-4, combined with bitumen oxidation, may have contributed to its higher stiffness (10.0% increase compared to HB-1). Increasing the mixing time of the countertop mixer (HB) affects the particle size distribution of the HMA, resulting in an increase in stiffness.

The stiffness of TR-2, TR-3, and TR-4 increased on average by 3.3%, 3.9%, and 12.7%, respectively. TR-2 and TR-3 showed similar stiffness, despite having higher voids for TR-2. Mixing time appeared to have a greater effect on ITSM results at lower temperatures (-20 and -10°C). The stiffness increase of TR-4 may be due to binder oxidation, as it was mixed for 160 s longer than TR-3 in a temperature-controlled mixer at the mixing temperature.

The one-way ANOVA conducted on the ITSM results shown in Tableau 9 reveals that both mixing time and mixer type have a significant effect on the means of the groups. The analysis compares all the mixers and finds that there is a significant difference in means between the groups of mixing time for all temperatures ($F\text{-value} > F\text{-crit}$ and $p\text{-value} < 0.05$). This results in the rejection of the null hypothesis, and it demonstrates that the findings are statistically significant.

Tableau 4.9 One-way ANOVA of ITSM results at -20 , -10 , 0 , and 10 °C
(significance level = 0.05)

	-20 °C			-10 °C		
	F-value	<i>p</i> -value	F-crit	F-value	<i>p</i> -value	F-crit
All mixer	3.159	0.002	1.952	8.607	0.000	1.952
TR	2.290	0.109	3.098	14.840	0.000	3.098
HB	9.892	0.000	3.098	6.126	0.004	3.098
PM	0.825	0.495	3.098	7.024	0.002	3.098
Mixer type	0 °C			10 °C		
	F-value	<i>p</i> -value	F-crit	F-value	<i>p</i> -value	F-crit
All mixers	6.161	0.000	1.952	19.221	0.000	1.952
TR	8.319	0.001	3.098	8.319	0.000	3.098
HB	14.138	0.000	3.098	3.242	0.044	3.098
PM	3.844	0.025	3.098	16.007	0.000	3.098

The results of the ANOVA for TR mixers indicate that there is a statistically significant difference in means between the groups for all the temperatures of -10 , 0 , and 10 °C. This is indicated by the F-value being greater than the F-crit value and the *p*-value being less than 0.05 (Tableau 4.9). However, at -20 °C, the F-value is lower than the F-crit value, and the *p*-value is greater than 0.05, indicating that there is not enough evidence to reject the null hypothesis, meaning that there is no significant difference in means between the groups at that temperature.

HB mixer ANOVA results indicate that there is a statistically significant difference in means between the groups for all temperatures tested. This is indicated by the F-value being greater than the F-critical value and the *p*-value being less than 0.05 for all temperatures. It suggests that mixing time does have an impact on the results for the HB mixer at any temperature.

PM mixer ANOVA results suggest that there is a statistically significant difference in means between the groups for temperatures of -10 , 0 , and 10 °C, as the F-value is greater than the F-

crit value and the p-value is less than 0.05. However, at -20°C , the F-value is lower than the F-crit value, and the p-value is greater than 0.05, indicating that there is not enough evidence to reject the null hypothesis, meaning that there is no significant difference in means between the groups at that temperature.

4.4.2.2 Effect of Air Voids on ITSM Results

Figure 4.10 presents the ITSM results at -20 , -10 , 0 , and 10°C in the function of air voids. Overall, the effect of air voids on stiffness is lower than expected. For most temperatures tested, there is not a significant increase in stiffness (ITSM) with decreasing air voids (V_a). By comparing the mix with the highest air void content (TR-1) and the lowest one (HB-4), with a difference of 4.0 percent of voids, the lowest variability is observed at 10°C with an increase of 0.1 percent, followed by -20°C , with a 3.2 percent increase, and 0°C (5.9 percent increase). The effect of voids is more important on the -10°C results, with an increase of 3086 MPa, or 15.5 percent. This could be an indication that other parameters affect the results that lower the stiffness through the mixing time. A longer mixing time could contribute to the activation of the RAP bitumen and raise the effective bitumen content. A higher bitumen content results in a lower stiffness.

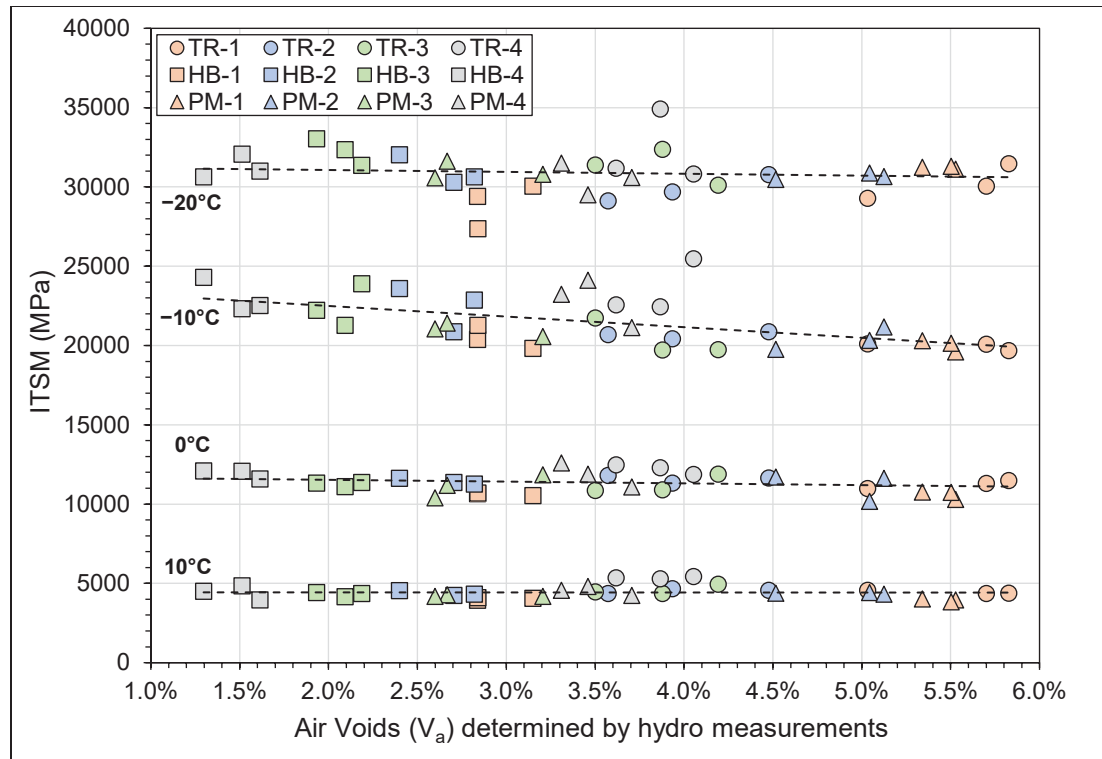


Figure 4.10 ITSM results at -20 , -10 , 0 , and 10 °C in the function of the air voids ($n = 3$ for each mixing condition and thus, $n = 36$ for each temperature)

4.4.2.3 Indirect Tensile Strength (IDT)

Figures 4.11 and 4.12 show the average IDT results at 25 °C and -20 °C, respectively. The average air voids have been plotted to observe the effect of voids on indirect tensile strength. The first thing to note is that the repeatability is better at 25 °C than at -20 °C. The specimens were conditioned for 4 h at the testing temperature prior to testing. After the installation of the specimen on the MTS press, the conditioning chamber temperature changed due to the opened door, and an additional conditioning time was carried out (five minutes after reaching the testing temperature). A higher IDT value indicates a better resistance to rutting.

For HB mixes, the IDT tends to increase with the second and third mixing times but decreases compared to the first mixing time when the fourth mixing time is used at both tested temperatures (Figures 4.11 and 4.12). In general, lower voids tend to result in higher IDT values, but this relationship does not hold for the HB-4 mix.

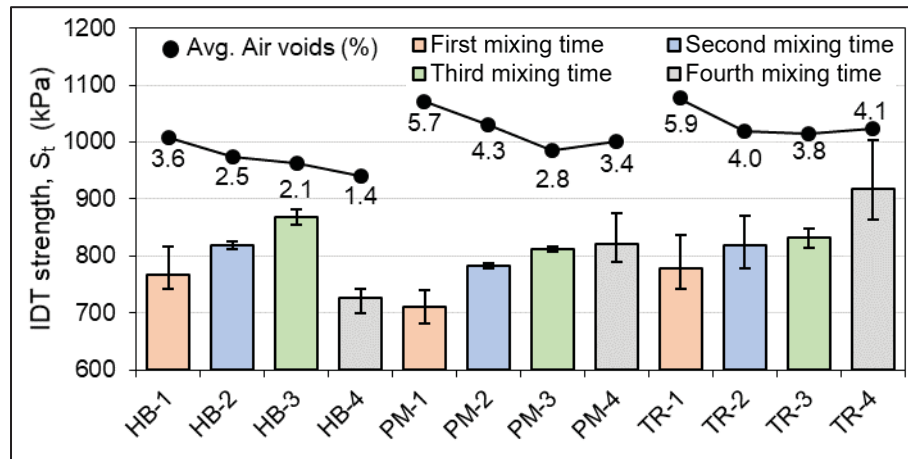


Figure 4.11 Indirect tensile strength (IDT) results at 25 °C ($n = 3$)

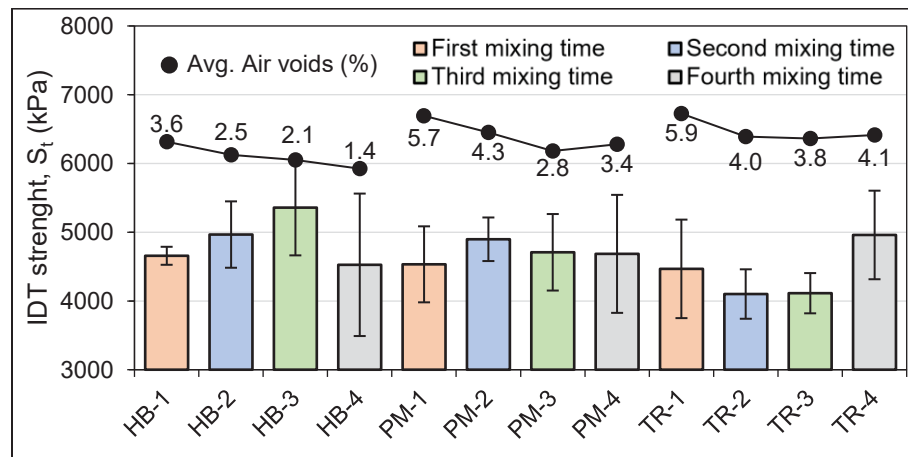


Figure 4.12 Indirect tensile strength (IDT) results at -20 °C ($n = 3$)

At 25 °C (Figure 4.11), the first mixing time produces the lowest IDT for the PM and TR mixes, and the IDT increases with each subsequent mixing time. This suggests that a longer mixing time leads to a higher quality mix for PM and TR. The highest value at 25 °C is obtained with the TR-4 mix with 918 kPa and the lowest is obtained with the PM-1 mix with 712 kPa.

At -20 °C (Figure 4.12), HB mixes follow the same trend as at 25 °C (Figure 4.11), with IDT going up until the HB-3 mixing time and then decreasing lower than HB-1. This could be related to the particle size distribution of the mix. PM-1 has the lowest IDT value, and the next

mixing time is higher. The high variability limits the interpretation of the results, since PM-2, PM-3, and PM-4 are in the same range of values. They still seem to have a higher IDT value than the first mixing time. The TR mixes' lowest IDT is obtained with the second and the third mixing time, followed by the first mixing time, and the last mixing time has the highest IDT value. Again, the high variability could affect the interpretation. The highest IDT value overall was obtained with the third mixing time of the HB mixer at 5358 kPa, while the lowest value was obtained with TR-2 at 4101 kPa.

The one-way ANOVA in Tableau 4.10 compares the IDT results of all mixers at different temperatures. At -20°C , the analysis finds that there is no statistically significant difference in means between the groups for mixing time, as the F -value is lower than the F -crit value, and the p -value is greater than 0.05. However, at 25°C , the results are statistically significant, as the F -value is higher than F -crit and the p -value is less than the significance level of 0.05. This suggests that mixing time has an impact on the IDT results at 25°C but not at -20°C when all mixer types are being compared.

Tableau 4.10 One-way ANOVA of IDT results at -20 and 25°C (significance level = 0.05)

	-20°C			25°C		
	F-value	p-value	F-crit	F-value	p-value	F-crit
All mixer	0.693	0.733	2.216	4.100	0.002	2.216
TR	0.755	0.550	4.066	2.120	0.176	4.066
HB	0.826	0.516	4.066	0.468	0.713	4.066
PM	1.043	0.425	4.066	5.037	0.030	4.066

The ANOVA results for the TR and HB mixers indicate that there is not enough evidence to reject the null hypothesis for both testing temperatures. This means that there is no statistically significant difference among the groups being compared in the ANOVA.

On the other hand, the PM mixer results at -20°C suggest that mixing time has no impact on the means of the groups. However, at 25°C , the results are statistically significant, indicating

that there is a significant difference in means among the groups for mixing time. This means that the null hypothesis is rejected at 25 °C for the PM mixer, but it is not for −20 °C (F-value > F-crit and p -value < 0.05 in Table 10).

4.4.2.4 Crack Tolerance Index (CT_{index})

The crack tolerance index (CT_{index}) has been calculated based on the IDT data at 25 °C and −20 °C, and the results are shown in Figures 4.13 and 4.14. The relationship between the CT_{index} and air voids is also shown in these figures. A higher CT_{index} value indicates greater resistance to cracking and is generally considered to be indicative of a higher quality asphalt mix. As a reference, asphalt mixes made with a non-modified bitumen typically have a CT_{index} of around 60 at 25 °C (Yan, Zhang & Bahia, 2020, Zhou, Sun & Sun, 2017). A lower CT_{index} value suggests that the asphalt mix is more prone to cracking under load and offers less relaxation.

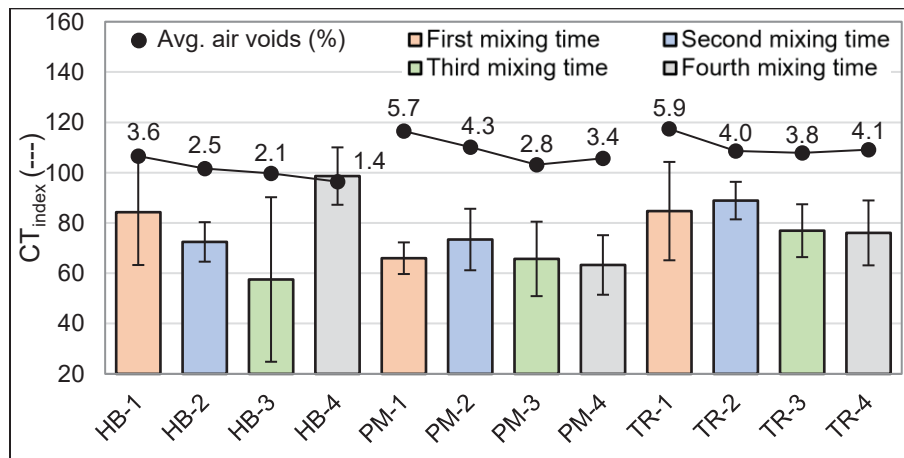


Figure 4.13 Crack tolerance index (CT_{index}) results at 25 °C ($n = 3$)

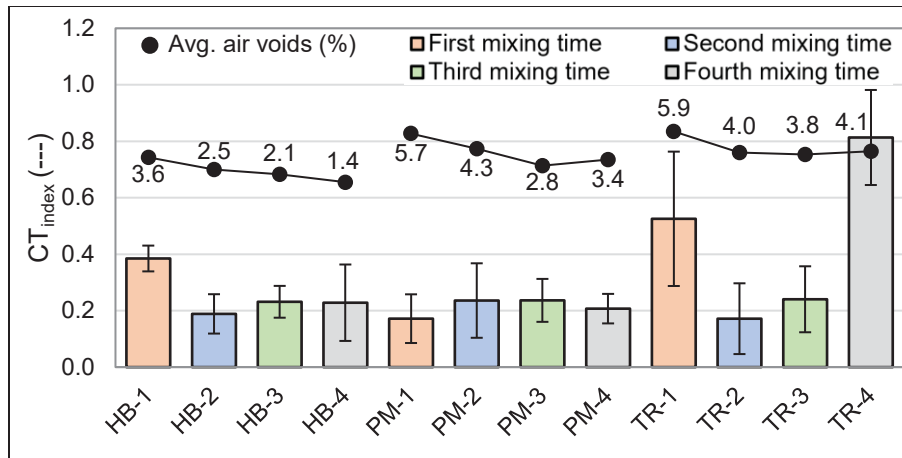


Figure 4.14 Crack tolerance index (CT_{index}) results at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($n = 3$).

At $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figure 4.13), mixes demonstrate strong resistance to cracking, but the specific mixing type and duration influence the outcome. Mixes classified as HB tend to show the same trend as for IDT, but with reversed results. Compared to the first mixing time, CT_{index} decreases for the second and third mixing times but is the highest for the fourth one. This could be due to a combination of the particle size distribution and the effective bitumen content. For the PM and TR mixes, the CT_{index} is highest for the second mixing time and then decreases with longer mixing times, deviating from the trend seen in IDT mixes. The HB mixer has the biggest influence on the CT_{index} value. The highest CT_{index} value is obtained for the HB-4 mix (99) and the lowest is obtained for the HB-3 mix (58). Air voids do not seem to have any effect on the CT_{index} .

As expected, at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figure 4.14), CT_{index} is a lot lower than the results at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, with an average of 0.4% of the value obtained at the previous temperature. During the test, specimens exploded when reaching their maximum value, and so did not show any crack propagation. This may be due to the fragile behavior of the material at this temperature. Overall, CT_{index} values varied from 0.17 (PM-1 and TR-2) to 0.81 (TR-4), which indicates no real resistance to cracking.

In Tableau 4.11, the one-way ANOVA reveals that there is no statistically significant difference in CT_{index} results among the mixers at various temperatures and mixing times, with the exception of the HB mixer at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, for which the F-value is greater than the F-crit value and the p -value is less than 0.05, indicating a significant difference.

Tableau 4.11 One-way ANOVA of CT_{index} results at -20 and $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
(significance level = 0.05)

	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$			$25\text{ }^{\circ}\text{C}$		
	F-value	p -value	F-crit	F-value	p -value	F-crit
All mixer	1.038	0.446	2.216	1.405	0.234	2.216
TR	0.863	0.499	4.066	1.078	0.412	4.066
HB	4.667	0.036	4.066	0.946	0.463	4.066
PM	0.338	0.799	4.066	0.525	0.678	4.066

4.4.2.5 Work of Failure (W_f) and Failure Energy (G_f)

Figure 4.15 presents an example of IDT results for HB-1 mix at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. The maximum force recorded during the test was 7.32 kN at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 46.78 kN at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. At $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, the mix continues to exhibit resistance after reaching the maximum load, resulting in a higher displacement before the load drops to 0.10 kN. At $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, the specimen breaks after reaching its maximum load and the test is completed more quickly. The maximum load is reached more quickly at lower temperatures.

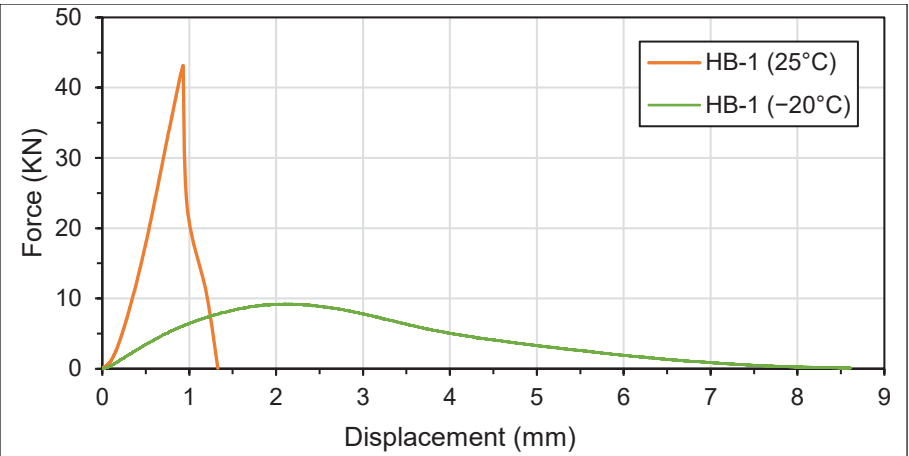


Figure 4.15 IDT results example: force recorded as a function of displacement for HB-1 specimens at 25 °C and -20 °C

The work of failure, or W_f , is a measure of the energy required to cause a material to fail, and it is represented by the area under the curve in an IDT test. The failure energy, or G_f , is a measure of the amount of energy required to break a sample, considering the dimensions of the sample. Figures 4.16 and 4.17 show the W_f and G_f values at 25 °C and -20 °C, respectively.

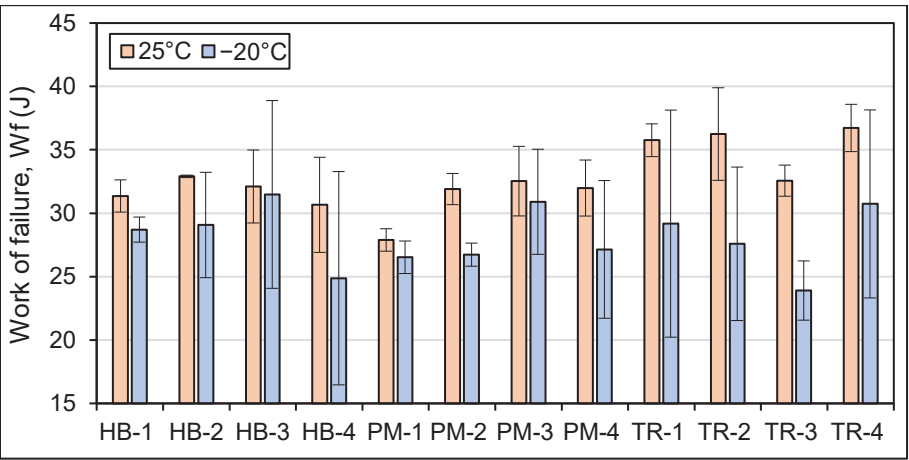


Figure 4.16 Work of failure (W_f) results at 25 °C ($n = 3$) and -20 °C ($n = 3$)

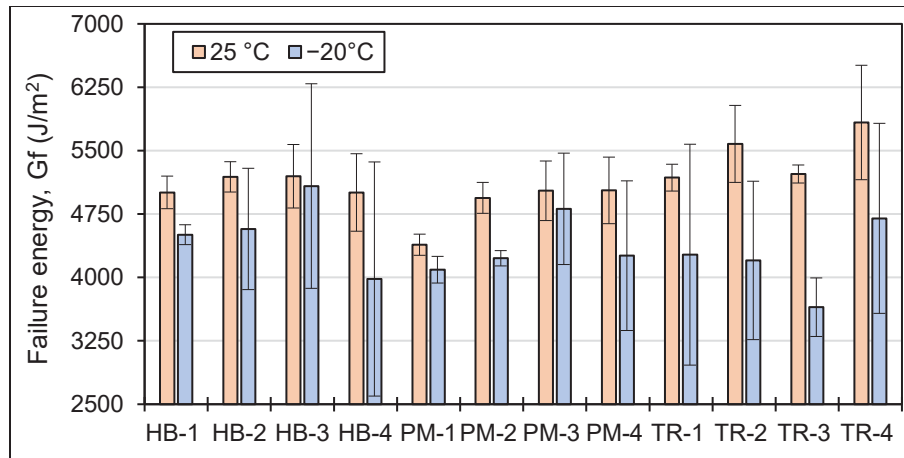


Figure 4.17 Failure energy (G_f) results at 25 °C ($n = 3$) and -20 °C ($n = 3$)

The work of failure (W_f) and failure energy (G_f) of asphalt tend to be higher at higher temperatures (25 °C vs -20 °C), indicating that more energy is required to cause the specimen to fail (Figures 4.16 and 4.17). This is because the sample is able to store more energy at higher temperatures, even if the force required to reach the maximum load is lower. The same trend is observed for both W_f and G_f , as the specimens used in the test have similar dimensions, with the exception of the air void content, which can affect the results. The mixer type and mixing time also influence the W_f and G_f values, but not significantly. Additionally, the repeatability of the test is better at a testing temperature of 25 °C.

For asphalt mixes produced using the HB mixer at a testing temperature of 25 °C, the effect of mixing time on the failure energy (G_f) value is minimal (Figure 4.17). The work of failure (W_f ; Figure 4.16) and G_f values for the first mixing time are 31 J and 5006 J/m², respectively, and they increase slightly for HB-2 (33 J and 5190 J/m²) and HB-3 (32 J and 5197 J/m²) but remain the same for HB-4 (31 J and 5005 J/m²).

For mixes produced using the PM mixer, the W_f and G_f values are lowest for the first mixing time (28 J and 4387 J/m²) but then stabilize at values ranging from 32 to 33 J and 4924 to 5030 J/m² for the subsequent mixing times.

For mixes produced using the TR mixer, the W_f and G_f values do not follow the same trend. TR-1 has the lowest G_f value (5181 J/m²), followed by TR-3 (5224 J/m²) and TR-2 (5580 J/m²), and TR-4 has the highest G_f value (5833 J/m²). The lowest W_f for TR mixes is obtained with the third mixing time (TR-3, 33 J), while TR-1 and TR-2 have the same value (36 J), and TR-4 has the highest W_f value (37 J).

At a testing temperature of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figures 4.16 and 4.17), the average work of failure (W_f) and failure energy (G_f) values are 14.0% and 14.8% lower, respectively, compared to the values obtained at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. The general trend of the W_f and G_f values at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ follows the same pattern as those at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, but with higher variability due to the increased fragility of the asphalt material at lower temperatures. The average standard deviation of all the results at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ is 5.9% for both W_f and G_f . For $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, the average standard deviation is 17.1% for W_f and 17.3% for G_f , indicating a greater degree of variability in the test results at this lower temperature.

The one-way ANOVA in Tableau 4.12 compares the W_f and G_f results of all mixers at different temperatures with the mixing time.

Tableau 4.12 One-way ANOVA of W_f and G_f results at -20 and $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (significance level = 0.05).

	Mixer type	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$			$25\text{ }^{\circ}\text{C}$		
		F-value	<i>p</i> -value	F-crit	F-value	<i>p</i> -value	F-crit
W_f	All mixer	0.693	0.733	2.216	4.100	0.002	2.216
	TR	0.755	0.550	4.066	2.120	0.176	4.066
	HB	0.826	0.516	4.066	0.468	0.713	4.066
	PM	1.043	0.425	4.066	5.037	0.030	4.066
G_f	All mixer	0.756	0.678	2.216	3.195	0.008	2.216
	TR	0.717	0.569	4.066	1.637	0.256	4.066
	HB	0.823	0.517	4.066	0.336	0.800	4.066
	PM	0.971	0.453	4.066	4.297	0.044	4.066

The ANOVA of W_f and G_f results shows that at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, the F-value is lower than the F-critical value, and the p -value is higher than 0.05 for all the results, indicating that there is no statistically significant difference between the groups being compared. At $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, when all mixer types are compared, the F-value is higher than the F-critical value, and the p -value is lower than 0.05, indicating that there is enough evidence to reject the null hypothesis and the results are statistically significant. The same trend is observed for TR and HB mixers, where the F-value is lower than the F-critical value and the p -value is higher than 0.05, indicating that the mixing time has no effect on the W_f and G_f results for those mixer types for both temperatures. However, for the PM mixer, the F-value is higher than the F-critical value, and the p -value is lower, indicating that mixing time has an impact on W_f and G_f results.

4.5 Conclusion

In conclusion, the study of the impact of mixing type and time on a semi-open graded hot-mix asphalt (HMA) with a high content (30%) of reclaimed asphalt pavement (RAP) was performed in the laboratory. It was shown that these factors can significantly affect the volumetric properties, compactability, and performance (mechanical properties) of the mixes. Three (3) types of mixers (thermoregulated, counter-top, and pugmill mixers) and four (4) mixing times (#1 to #4) were used in the study, and a range of tests (G_{mm} , ignition oven, sieve analysis, SGC, IDT, ITSM) were conducted. Overall, the results show:

- For volumetric properties, G_{mm} and V_a generally decrease with the increase in mixing time. The TR mixer reaches a point of stability after reaching a certain mixing time. On the other hand, P_{ba} , VMA, V_{be} , VFA, and particles that are smaller than $80\mu\text{m}$ increased with the mixing time for all mixer types, but the HB and PM mixers have a greater impact on these properties.
- Increasing the mixing time for all types of mixers can improve the compactability of the material, making it easier to apply on the field. The voids in the material when compacted using the Marshall method (40 blows on each side) are generally lower than those obtained

using the SGC compactor at N_{design} . Again, the HB and PM mixers have a greater impact on compactability.

- The mechanical properties of the mixes were found to be influenced more by the mixing conditions than the voids. The voids had a greater impact on the stiffness of the mix in ITSM tests at a temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, but other factors, such as the mix's volumetric properties and the mobilization of RAP bitumen, also affected the stiffness of the mix. In IDT tests, stiffness was affected by the type of mixer and mixing time, but no correlation with the voids can be observed. The CT_{index} had good results at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, but no crack resistance was observed at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ due to the brittle nature of the HMA. The energy stored during the test indicated that more energy was stored at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, even though a higher maximum load was achieved at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- The ANOVA indicates that the ITSM results are the most affected by the mixing time and type. The results suggest that as the testing temperature increases, the mixing time has a more pronounced effect on ITSM and other performance parameters. This implies that at higher temperatures, the mixing time has a more significant impact on the stiffness and strength of the asphalt mixture.

The results of the study demonstrate that it is crucial to carefully consider mixing time and type to produce mixes that meet the required specifications (V_{be} , V_{a} , and $80\mu\text{m}$ passing content) and have good resistance to cracking. Additionally, the impact of voids on the mixes was also examined, with the results showing that voids can have a significant impact on the properties of the mixes (V_{be} , VMA , and VFA). Other factors that influence mix performance include fine particle concentration. A longer mixing time tends to generate more fine particles and facilitate the compactability of the mix. It is important to consider the generation of fine particles to ensure that the mix meets specifications. For mix design, it may be beneficial to aim for lower control points below the maximum limit after the mixing time. When using RAP, 30% here, the mixing time and type of mixer used can affect the amount of RAP bitumen that is activated. This can have an impact on the performance of the mixture, so it would be valuable to conduct further research on this topic. Because of this, good control of the mix production in the laboratory is probably even more important for mixes with RAP than for virgin

mixes. It would also be worthwhile to conduct further research on the impact of the mixer type and mixing time on asphalt plant mixes' properties and performance.

CHAPITRE 5

EXPLORING THE EFFECTS OF RAP BITUMEN MOBILIZATION ON HOT-MIX ASPHALT PERFORMANCE AND THE USE OF BITUMEN BLENDING CHARTS TO PREDICT THEM: A LABORATORY INVESTIGATION

Marc-André Bérubé^a, Sébastien Lamothe^b, Kevin Bilodeau^c and Alan Carter^d

^{a,b,d} Department of Construction Engineering, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

^c Bauval Inc.
210 Bd De Montarville, Boucherville, Québec J4B 6T3

Article soumis pour publication dans la revue « *Journal of Testing and Evaluation* », avril 2024

5.1 Abstract

This laboratory-based research investigates into the critical issue of validating bitumen blending charts for asphalt mix performance. These include evaluations of volumetric properties, compactability, rutting performance, thermal cracking resistance and viscoelastic behaviour, all of which contribute to the overall performance of asphalt mixtures. The central focus of this study revolves around the varying levels of reclaimed asphalt pavement (RAP) content, ranging from 0 to 100 %. This content variation impacts the performance of five different asphalt mixtures, developed to meet a MUN-10 Quebec mix, a hot mix asphalt (HMA) used as a surface layer in municipal road construction.

In the mix design process, two distinct bitumen content scenarios are considered. The first scenario involves the use of bitumen where 100 % of the RAP bitumen is considered mobilizable, indicating that it can fully contribute into the asphalt mixture performance. In the second scenario, 60 % of the RAP bitumen is considered mobilizable, or contribute to the cohesion of the material, based on the total amount of bitumen of the 100 % RAP mix. The insights derived from this study hold significant value in validating the practical application of bitumen blending charts for predicting asphalt mix performance, as compactability, rutting and

viscoelastic properties. Additionally, the research contributes to evaluating the RAP bitumen properties without doing extraction with solvent like trichloroethylene. The utilization of recycled bitumen ratio (RBR) parameter serves as a predictive tool for appraising the behaviour and performance of asphalt mixtures. This approach significantly augments the body of knowledge in the domain of pavement engineering and construction. Most of the bitumen from RAP seems to be mobilizable.

5.2 Introduction

The addition of reclaimed asphalt pavement (RAP) in new hot mix asphalt (HMA) has surged in recent years, driven by its potential to reduce waste and enhance the sustainability of asphalt production (EAPA, 2014; AAPA, 2018; Zaumanis and Mallick, 2015). However, it is crucial to understand how the inclusion of RAP can impact the properties and performance of the resulting mix (Tarsi & al., 2020; Behnia & al., 2011). The incorporation of RAP in new asphalt mixes can yield various effects, both positive and negative. One potential advantage of RAP is cost savings, as it is typically more economical than using all-new materials. Additionally, RAP can offer environmental benefits by decreasing the need for new aggregate and bitumen materials, conserving natural resources. Also, RAP can enhance the strength (value of complex modulus) and durability of the HMA. Despite these potential benefits, it is essential to thoroughly assess the potential effects of adding RAP before incorporating it into the HMA, especially concerning its performance at low temperatures (Behnia & al., 2011; Babgoli & al., 2021). The behaviour of the HMA may become more brittle at low temperatures when RAP is used.

Typically, assessing the temperature grading of RAP requires extracting bitumen using solvents like trichloroethylene (TCE) and testing the recovered binder. TCE poses environmental and health risks due to its volatile organic compound (VOC) classification (Frant & Westendorp (1950). The extracted bitumen is then subjected to a series of tests, such as Bending Beam Rheometer (BBR) and Dynamic Shear Rheometer (DSR) tests, to assess its low and high temperature performance grading, respectively (You & al., 2011).

The degree of mobilization of the RAP bitumen is a crucial factor in understanding its behaviour within HMAs. Mobilization refers to the extent to which the bitumen from RAP becomes active and contributes to the overall binder properties of the mix (Abed & al., 2018; Sreeram & Leng, 2019). In some cases, not all of the bitumen in RAP is fully mobilized, meaning that it may not fully participate in binding the aggregate particles together. Factors such as the age and condition of the RAP, as well as the mixing and compaction processes, can influence the degree of mobilization.

Another interesting parameter is the recycled bitumen ratio (RBR), expressed in %, that is obtained with the Equation 5.1:

$$RBR = \frac{Pb_{RAP} * P_{RAP}}{Pb_{total}} \quad (5.1)$$

Where Pb_{RAP} represents the percentage of bitumen in the RAP, P_{RAP} is the proportion of RAP in the asphalt mix, and Pb_{total} is the total bitumen content in the mix, including both virgin and RAP bitumen. A RBR of 100 % would mean that the bitumen comes only from the RAP and a virgin asphalt mix with no RAP would have a RBR of 0 %. This parameter is more effective than simply considering the RAP content, as it accounts for the richness of RAP in bitumen. Consequently, RAP with a lower bitumen content will have a lesser impact on mix properties and performance compared to RAP with a higher bitumen content (Sanchez & Tighe, 2019; Kaseer & al., 2018).

The main objective of this study is to analyze the effect of RAP-derived bitumen on the performance of HMA, focusing on the RBR as a more indicative measure than the overall RAP content. Additional objectives include:

- Assessing the influence of RBR on the overall performance of the mix, and exploring how variations in added virgin bitumen affect the mobilization of RAP bitumen. This will assist in determining whether RAP contributes primarily as aggregate (referred to as "black rock") or as an active binder component.
- Developing a method to evaluate the properties of RAP bitumen without the use of solvents, thereby promoting a safer and more environmentally conscious approach.
- Examining the accuracy of a blending chart in forecasting key performance indicators for HMA, which encompasses aspects such as compactability, resistance to rutting, and viscoelastic behaviour.

5.3 Experimental study

5.3.1 Materials

The materials used in this study are virgin aggregates, virgin bitumen, and RAP. The chosen virgin aggregates consisted of three types of granite aggregates with particle sizes of 0-2.5 mm, 0-5 mm, and 5-10 mm. These aggregates were sourced from a quarry and sampled in accordance with the Quebec testing method LC 21-010.

In the laboratory, the aggregates were recombined using the quartering method, following the Quebec testing method LC 21-015. The selection of these aggregates was based by their robust resistance to attrition, ensuring their suitability for asphalt mixtures. Tableau 5.1 shows the properties of the virgin aggregates employed in this study, encompassing intrinsic properties, specific gravity, and angularity. These properties were determined following the Quebec standards (BNQ: Bureau de Normalisation du Québec) and corresponding test methods (LC: Laboratoire des Chaussées).

Tableau 5.1 Virgin aggregates properties

Property	Unit	Result for			Test method or standard
		0-2.5 mm	0-5 mm	5-10 mm	
Friability	%	25	25	n.a.	LC 21-080
Micro-Deval (MD)	%	23	20	7	LC 21-070 and LC 21-101
Los-Angeles (LA)	%	n.a.	n.a.	22	LC 21-400
Crushed particles	%	100	100	100	LC 21-100
Particle content < 5 μm	%	0	2.5	n.a.	BNQ 2501-025
Bulk density gravity (G_{sb})	---	2.723	2.718	2.721	LC 21-065
Absorption (abs)	%	0.29	0.40	0.49	LC 21-066
n.a. Not applicable.					

The selection of the virgin bitumen in this study is, to counteract the effects from the aging and oxidation of bitumen in RAP on asphalt pavement performance, a PG 52S–34. The utilization of a softer bitumen grade is designed to alleviate issues related to aging and oxidation, which can otherwise have detrimental effects on the durability and flexibility of asphalt mixtures (Babagoli & al., 2021). Tableau 5.2 provides a summary of the properties of the virgin PG 52S–34 bitumen and RAP-extracted bitumen employed in this study.

Tableau 5.2 Virgin and RAP bitumen properties

Property	Unit	Result		Standard
		Virgin	RAP ¹	
High-temperature (T_{high})	°C	52.7	84.0	AASTHO T315
Low-temperature (T_{low})	°C	−34.9	−24.0	AASTHO T313
Creep compliance ($J_{\text{nr}3.2}$)	kPa ^{−1}	3.18	n.d.	AASTHO T350
Performance grade, PG (Hn-L)	°C	52S−34	82−22	---
Mixing temperature ($T_{\text{mix.}}$)	°C	136	174	AASTHO T316
Compaction temperature ($T_{\text{comp.}}$)	°C	125	161	AASTHO T316
Density at 25 °C (G_b)	kg/m ³	1017	1020	ASTM D70
RAP bitumen content ($P_{\text{bRAP.}}$)	%	---	5.0	LC 26-006
¹ Extracted with trichloroethylene following the Quebec testing method LC 25-001. No aging has been applied before testing the RAP bitumen.				

5.3.2 Mix design

Figure 5.1 presents the gradation of the studies mixes. All of the mixtures adhere to the requirements of a MUN-10 HMA (standard 4202 of Ministère des Transports et de la Mobilité Durable: MTMD). The most significant variances are noted in the 315 µm and 630 µm sieves, where they remain below 10 %. For all other differences, they are less than 5 %, and each mixture contains an equivalent quantity of materials passing through the 80 µm sieve. These gradation differences can be attributed to the finer particles inherent in RAP aggregates, resulting in a progressively finer mix as the RAP content increases.

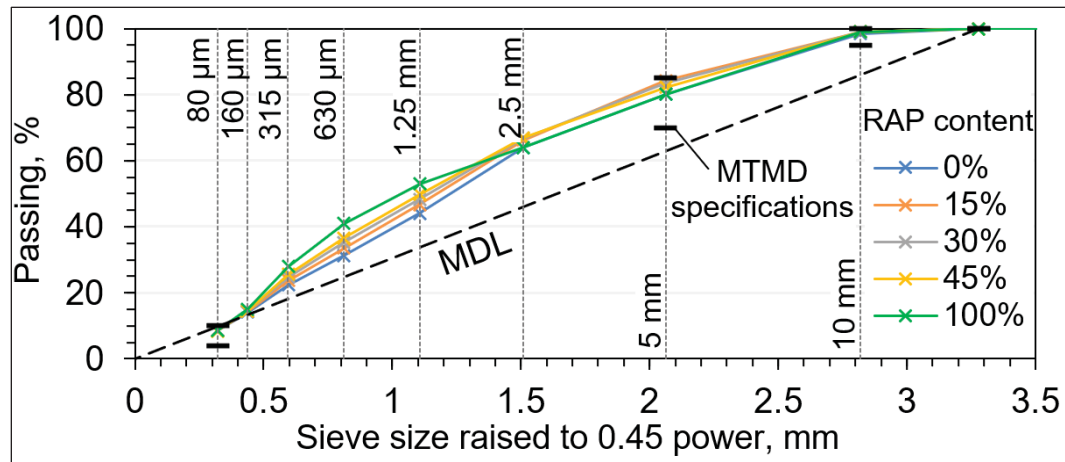


Figure 5.1 Mixes gradation, maximum density line (MDL) and MUN-10 specifications

The total amount of bitumen of each mix was determined by the bitumen content in the RAP, with the goal being to maintain a consistent volume of effective asphalt binder (V_{be}) across all mixes under the assumption that 100 % of the RAP bitumen is fully mobilized. A second bitumen content for mixes that contain 15, 30 and 45 % of RAP, where an additional quantity of virgin bitumen was included, calculated at 40 % of the RAP bitumen content, was introduced to support the hypothesis that 60 % of the RAP bitumen is effectively mobilizable (Ma & al., 2022). According to the MTMD standard 4202, the V_{be} for MUN-10 is set at 13.3 %, though some mixtures in this study may not adhere to this standard because it was dictated by the RAP effective bitumen content.

The composition of each asphalt mix was based on the bitumen found within the RAP, aiming for a uniform effective volume of asphalt binder (V_{be}) in all mixes. This was under the presumption that the entire bitumen content of the RAP could be completely activated and utilized (full mobilizable). For the mixes containing 15, 30, and 45% RAP, a supplementary amount of fresh bitumen was incorporated, calculated to be 40% of the RAP bitumen content (60% mobilizable). This adjustment was made to align with the theory that 60% of the RAP bitumen could be fully mobilized. According to the MTMD standard 4202, the prescribed V_{be} for the MUN-10 mix is established at 13.3%. However, it's possible that some of the mixtures

in this study did not conform to this standard, as the effective bitumen content was determined by the actual mobilization rate of the bitumen in the RAP.

5.3.3 Methodology

Figure 5.2 presents a schematic representation of the research methodology. The procedure involved combining all the elements of the asphalt mix in a thermoregulated (TR) mixer. The mixing process was selected based on a prior study (Kaseer & Arambula, 2019; Bérubé & al., 2023), which identified that the duration of mixing and the type of mixer used significantly affects the properties of the mix, particularly noting that extended mixing times improve the performance of RAP bitumen (McDaniel & Anderson. 2001). This enhancement is attributed to the activation of RAP bitumen and it is improved the blending with new bitumen, resulting in a uniform material cohesion. Notably, the TR mixer preserves the aggregate size distribution by avoiding the crushing of aggregates, a common issue with conventional laboratory mixers.

To minimize the impact of temperature variables, all mixtures were prepared at a consistent temperature, adhering to the Quebec LC method for the utilized virgin bitumen. For the mixing process, virgin aggregates and virgin bitumen were heated to a mixing temperature of 140 °C, while the RAP was preconditioned at 60 °C before being added to the mixer. Both virgin aggregates and RAP were introduced into the preheated mixer at the mixing temperature, and bitumen was added once the combined aggregates reached the desired temperature. An initial mixing period of 60 seconds was followed by manual stirring to ensure no clumps were present at the mixer's bottom. Subsequently, a 160 second mixing duration was employed to complete the mixing procedure.

This study involved the production of asphalt mixes that contain similar gradation (Figure 5.1), by varying RAP content, ranging from 0 to 100 % (0, 15, 30, 45, and 100 %). For mixes containing 15, 30 and 45 % RAP, two (2) different virgin binder content scenarios were considered, resulting in a total of eight (8) asphalt mixes. The first scenario assumed that 100 % of the RAP binder is mobilizable, called full mobilizable (FM), while the second scenario

considered 60 % mobilization of the RAP binder, call 60M. Virgin binder, PG 52S–34 for all mixes, has been replacing the non-mobilizable RAP binder. It's important to note 100 % of the RAP bitumen is considered mobilizable for the calculation of the volumetric properties.

Following the mixing process, the mixes designated for assessing volumetric properties, compactability, thermal cracking, and viscoelastic behaviour were subjected to an aging protocol at the compaction temperature of 130 °C for two hours. However, the mixes prepared for the evaluation of permanent deformation were not aged, in adherence to the LC 26-410 Quebec test method. In particular, non-aged bitumen tends to rut more than aged one. The assessment of volumetric properties was based on the results obtain from the maximum specific gravity (G_{mm}), via the volumetric method outlined in the Quebec testing method LC 21-045. The compactability of these mixes was determined using the Shear Gyratory Compactor (SGC) as per the LC 26-003 testing method. Uniform compaction temperature (130 °C) was maintained across all mixes to specifically analyze the influence of RAP content on compactability.

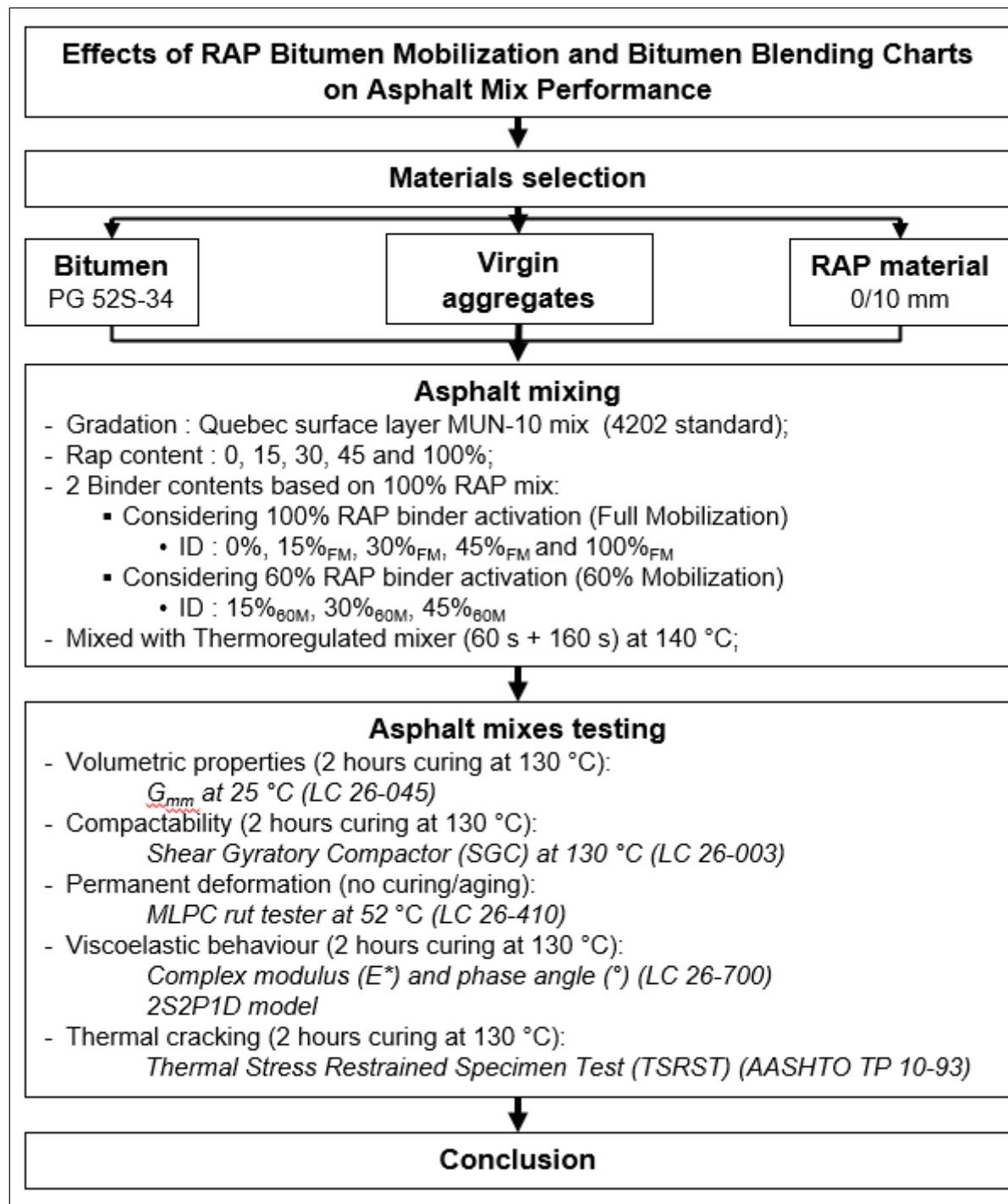


Figure 5.2 Research organigram

For the evaluations of rutting performance, viscoelastic behaviour, and thermal cracking, slabs were compacted using the French wheel compactor targeting an air void content (V_a) of 5 %. Slabs for permanent deformation tests were formed to the dimensions of 50 x 180 x 500 mm³ according to the testing methods prescribed in LC 26-400 and LC 26-410 and all the mixes were tested at 52 °C, based on the virgin binder PG grade (PG 52S–34). For studies on viscoelastic behaviour and thermal cracking resistance, slabs of 125 x 400 x 600 mm³ were compacted in accordance with the LC 26-400 testing method. Cylindrical samples for these tests were then cored, in the same direction as compacting, from the slabs as depicted in Figure 5.3. A segment of the compacted slab of 125 x 150 x 400 mm³ has been set aside for future research purposes.

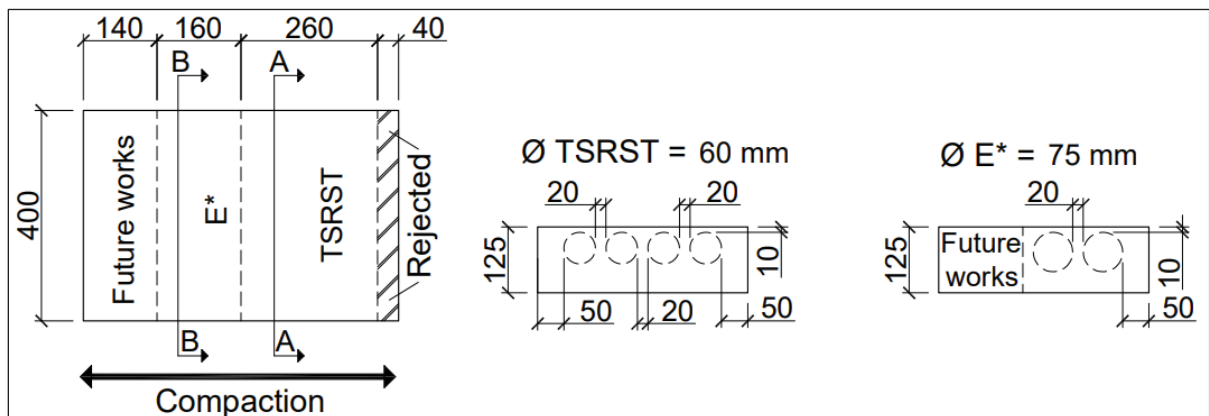


Figure 5.3 Compacted slab cutting section: a) Plan view cut; b) A-A section: TSRST samples coring and; c) B-B section: E* samples coring (dimensions in mm)

Samples for the complex modulus (E^*) testing were cylindrical, with a diameter of 76 ± 0.5 mm and a height of 150 ± 2.5 mm. The procedure for the E^* test was in accordance with the LC 26-700 method. The tests spanned a wide range of temperatures, specifically at -35 , -25 , -15 , -5 , 5 , 15 , 25 , and 35 °C. Prior to each test, samples were conditioned at the respective testing temperature for a duration of four hours. The frequencies applied during testing were varied, including 10, 3, 1, 0.3, 0.1, 0.03 and 0.01 Hz.

The rheological model known as 2S2P1D was utilized to simulate the viscoelastic linear (VEL) properties of the asphalt mixes under investigation. This model incorporates seven parameters (E_{00} , E_0 , k , h , δ , β , and τ_0) representing two springs, two parabolic elements, and a dashpot. It is particularly adept at characterizing the LVE response of bituminous materials within the realm of low deformation, which includes mixes containing RAP (Olard & Di Benedetto, 2003; Mangiafico, Sauzéat & Di Benedetto, 2019a; Magiafico, Sauzéat & Di Benedetto, 2019b). For the assessment of the VEL characteristics of the samples, the model was applied at a reference temperature (T_{ref}) of 10°C. William-Landel-Ferry (WLF) equation was calibrated to embody the Time-Temperature Superposition Principle (TTSP), allowing for the study of material behaviour across different temperatures (Williams, Landel & Ferry, 1955).

The Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST), conducted in accordance with the AASTHO TP 10-93 standard, assesses the asphalt mix's resistance to thermal cracking. The dimensions of the TSRST specimens are set at 58 ± 1 mm in diameter and 250 ± 5 mm in length. These specimens are secured in a testing apparatus designed to inhibit any axial movement and are preconditioned at 5 °C for four hours prior to the initiation of the test. Throughout the testing process, the temperature is systematically reduced at a rate of 10 °C per hour, while the stress within the specimen is closely monitored until fracture occurs. The stress level and temperature at fracture, referred to as fracture stress ($\sigma_{fracture}$) and fracture temperature ($\theta_{fracture}$) respectively, are meticulously analyzed to gauge the mix's susceptibility to thermal cracking.

5.4 Test results and discussions

5.4.1 Volumetric properties: G_{mm} test

Figure 5.4 presents the maximum specific gravity (G_{mm}) of asphalt mixes with varying RAP content and the considerate degrees of mobilization. There's a discernible non-linear trend in how the G_{mm} values alter in relation to both the amount of RAP added and the presumed degree of mobilization.

Significantly, the asphalt mixes characterized as mix 60M, which have the assumption that 60% of the RAP bitumen is mobilized, uniformly show lower G_{mm} values than other mixes with the same level of RAP. This likely from a higher content of bitumen being present. There's an observable linear decline in G_{mm} that correlates with the increase in total bitumen content within the mixture. In comparison with the fully mobilizable mixes (denoted as FM), the mix containing 100% RAP has a lower G_{mm} , compared to the lower RAP content mixes having relatively comparable G_{mm} . This indicates that the G_{mm} is impacted by additional elements beyond just RAP content, such as the specific gravity of the aggregates and the characteristics of the recycled bitumen.

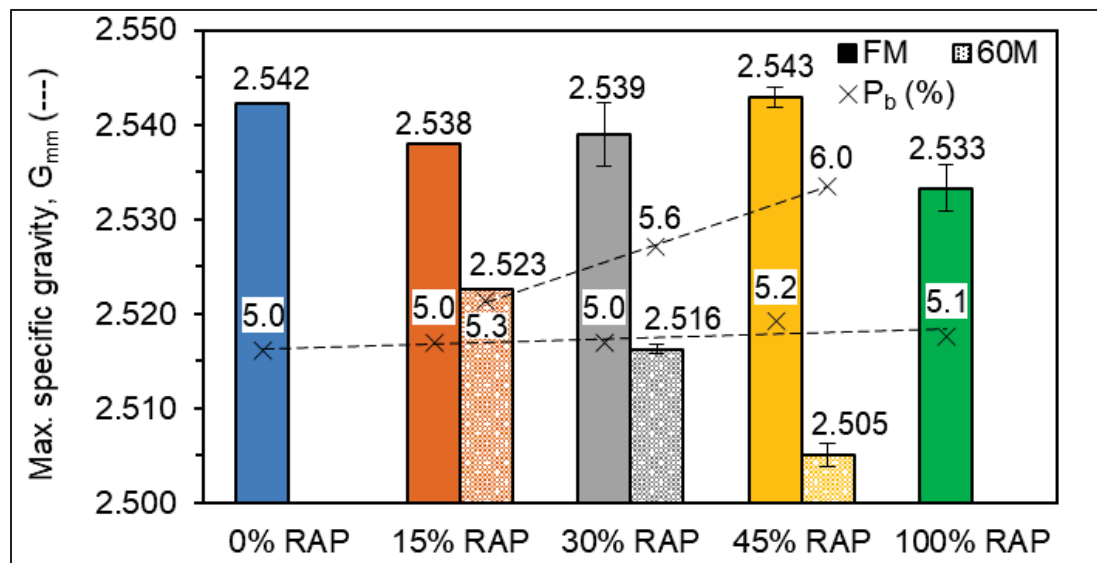


Figure 5.4 Maximum specific gravity (G_{mm}) results (n=2)

Tableau 5.3 shows the properties calculated from the G_{mm} values (Figure 5.4) and material properties (Tableau 5.1 and Tableau 5.2). These properties have been calculated to ensure uniformity across the mixes, allowing for a focused examination of the impact of RAP addition while minimizing variability in the mix properties.

Tableau 5.3 Volumetric's properties of the studies mixes (n=2)

Mix property	Unit	RAP content (%) Degree of mobilization (%)							
		0	15 _{FM}	30 _{FM}	45 _{FM}	100 _{FM}	15 _{60M}	30 _{60M}	45 _{60M}
Percent of effective binder (P_{be}) ¹	%	4.50	4.57	4.54	4.52	4.58	4.91	5.13	5.45
Volume of effective asphalt binder (V_{be}) ^{1,2}	%	11.2	11.4	11.3	11.3	11.4	12.2	12.7	13.4
Passing 80 μ m sieve (% _{passing, 80 μm})	%	8.6	8.6	8.6	8.5	8.6	8.6	8.6	8.5
Recycled Bitumen Ratio (RBR)	%	0.0	15.1	30.2	44.2	100.0	14.4	27.0	37.9
Dust to effective binder ratio (% _{passing, 80 μm} / P_{be})	---	1.91	1.75	1.88	1.66	1.89	1.58	1.90	1.86
Surface area for the aggregates (SSA) ³	m ² /kg	8.81	9.08	9.25	9.31	9.69	9.08	9.25	9.31
Asphalt film thickness (AFT) ³	μ m	5.27	5.20	5.07	4.99	4.88	5.60	5.76	6.10
Total asphalt binder content (P_b) ⁴	%	4.97	5.02	5.02	5.15	5.06	5.28	5.63	6.01
RAP asphalt binder content ($P_{b, RAP}$) ⁴	%	0.00	0.76	1.52	2.28	5.06	0.76	1.52	2.28
Voids in the mineral aggregate (VMA) ^{1,3,5}	%	14.8	14.9	14.8	14.8	14.9	15.7	16.2	16.9
Voids filled with asphalt (VFA) ^{1,3,5}	%	75.9	76.3	76.1	76.1	76.3	77.6	78.4	79.5
Percent of absorbed binder (P_{ba}) ^{1,3}	%	0.50	0.47	0.50	0.67	0.50	0.39	0.53	0.60
P_{be} function of % mobilization ($P_{be, BERUBE}$) ⁶	%	4.50	4.57	4.54	4.52	4.58	4.61	4.52	4.54
¹ Based on Quebec test method LC 26-045.		⁵ Calculated at 4% of air voids (V_a).							
² V_{be} calculated at 0 % air voids (V_a).		⁶ Constituting the total of added bitumen							
³ Based on Quebec test method LC 26-900.		and RAP bitumen considered 100 %							
⁴ Constituting the total of added bitumen and RAP bitumen considered 100 % mobilizable.		mobilizable (XX _{FM}) or 60 % mobilizable (XX _{60M}).							

As the RAP content increases in the mixes, there is a rise in the percent of effective binder (P_{be}), from 4.50 % (Tableau 5.3), especially noted in the mixes treated with 60 % mobilizable RAP (60M) where the P_{be} value escalates due to the addition of virgin bitumen (up to 5.45 %). The volume of effective asphalt binder (V_{be}) follows this trend, with the 45_{60M} mix showcasing the highest V_{be} (13.4 %), suggesting more binder is available for effective aggregate coating. According to the Quebec MUN-10 standard, only the 45_{60M} mix meets the V_{be} requirement, suggesting that all other mixtures in the study have insufficient bitumen content which could impact the performances on mix, such as thermal cracking resistance (Carter, 2002).

The dust to effective binder ratio ($\%_{\text{passing},80\ \mu\text{m}}/P_{\text{be}}$) for most mixes surpasses the standard threshold of 1.6 (values from 1.58 to 1.91: Tableau 5.3), potentially indicating a risk of moisture damage due to an overabundance of fines (Kandhal & Chakraborty, 1996). The specific surface area (SSA) of the aggregates grows as the RAP content rises, with the mixture containing 100% RAP displaying the largest SSA. This trend can be attributed to changes in the grading of the mix, where the 100% RAP mix has the finest gradation. Conversely, the asphalt film thickness (AFT) does not maintain a consistent relationship with the RAP content. It reaches its maximum in the 45_{60M} mix, suggesting optimal coating of the aggregates, but reduces in the 100_{FM} RAP mix. This decrease is likely the result of concurrent adjustments in HMA gradation and the amount of bitumen present, affecting the AFT despite the high RAP content.

For mixes considering 60 % of the bitumen as mobilizable (60M), the total asphalt binder content (P_b) climbs with RAP content, peaking in the 45_{60M} mix (4.97 to 6.01 %). This implies potential performance benefits, provided the recycled bitumen is effectively mobilized. Correspondingly, $P_{b,\text{RAP}}$ escalates with RAP content, with the maximum in the 100 % RAP mix, indicating a higher reliance on recycled binder. Voids in the mineral aggregate (VMA) and voids filled with asphalt (VFA) remain relatively stable across all mixes, suggesting that the mix structure and its capacity to accommodate asphalt are preserved despite varying RAP levels. The percentage of binder absorption (P_{ba}) shows a range from 0.39 to 0.67 and does not present any discernible pattern.

The revised P_{be} values are homogeneous throughout the mixes, suggesting that the method used to measure the effective binder content can reliably maintain consistency across different RAP contents and mobilization levels. This uniformity is crucial for ensuring that the use of RAP does not adversely affect the behaviour and performance of the asphalt mixes based on Recycled Bitumen Ratio (RBR).

5.4.2 Compactability: SGC test

Tableau 5.4 and Figure 5.5 illustrate the Superpave Gyratory Compactor (SGC) test results in relation to the Quebec MUN-10 HMA specifications from the MTMD 4202 standard. All mixes were compacted at the same temperature (130 °C), demonstrating comparable volumetric properties as per Tableau 5.3 and gradations as per Figure 5.1. The influence of RAP content on compaction is apparent from both the Tableau 5.4 and Figure 5.5. A notable linear reduction in air voids (V_a) with increased RAP content is observed for the FM mixes, indicating a strong correlation. This could be due to the different properties of RAP aggregates compared to virgin aggregates, as observed in other studies (Leiva & West, 2008). The presence of clusters in RAP could potentially make the aggregates more rounded, thereby improving compactability (Ferreira & al., 2022; Braham & al., 2015). The 100_{FM} mix shows the lowest V_a , failing to meet the 10 and 80 gyrations specifications, yet it complies with the 200-gyrations requirement. For this mixture, a change in the gradation could have led to satisfactory results, but that was not the focus of the current study. In contrast, the 0, 30_{FM} and the 45_{FM} mixes meet all specified standards for the MUN-10 mix. However, the 15_{FM} mix does not satisfy the 80-gyrations specification, presenting a V_a of 7.3 %.

Tableau 5.4 SGC results at 10, 60, 80, 100 and 200 gyrations (n=1)

Mix (ID)	Recycle Bitumen Ratio, RBR (%)	Voids at $N_{gyration}$ (%)				
		N_{10}	N_{60}	N_{80}	N_{100}	N_{200}
0	0	12.3	7.4	6.8	6.3	4.9
15 _{FM}	15.1	13.1	8.1	7.3	6.9	5.5
30 _{FM}	30.2	12.1	7.1	6.5	6.0	4.6
45 _{FM}	44.2	11.5	6.5	5.9	5.4	4.1
100 _{FM}	100.0	8.9	3.8	3.2	3.0	2.3
15 _{60M}	14.4	11.7	6.5	5.7	5.2	3.7
30 _{60M}	27.0	10.5	5.3	4.6	4.1	2.8
45 _{60M}	37.9	9.4	4.1	3.4	3.0	2.1
MTMD 4202 standard specifications		≤ 11	N/A	4 - 7	N/A	≥ 2

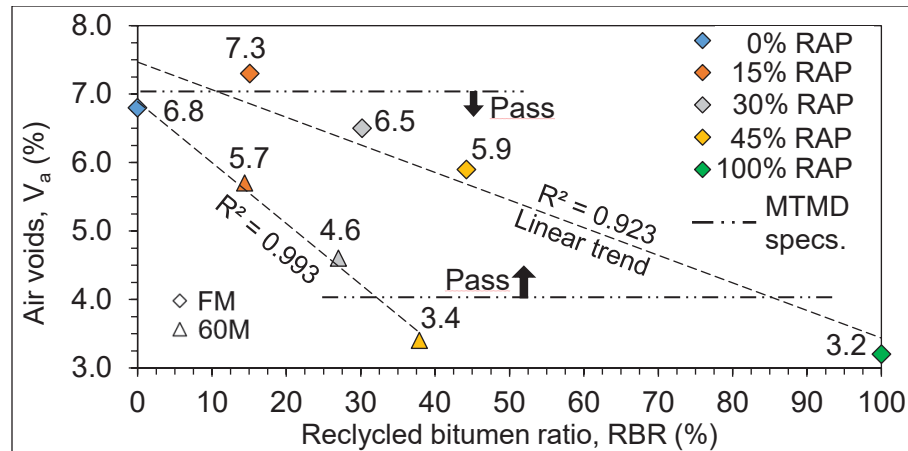


Figure 5.5 SGC results at 80 gyrations (N_{design}) in function of RBR ($n=1$)

For mixes where 60 % of the RAP bitumen is considered mobilizable (60M mixes), the trend is similar, with V_a decreasing as RAP content increases. Only the 1560M mix adheres to the MTMD 4202 specifications. On average, the V_a for the 1560M mix is 1.6 % lower than the 15FM mix, the 3060M mix is 1.8 % lower than the 30FM mix, and the 4560M mix is 2.3 % lower than the 45FM mix. This reduction in V_a suggests that replacing non-mobilizable bitumen with virgin bitumen leads to richer mixes with higher RAP content. The results suggest that a substantial amount of the RAP bitumen is accessible and mobilizable, enhancing the compactability of the mixes. More than 60% of the RAP bitumen appears to be mobilizable. Additionally, the presence of more bitumen can improve compaction, and the presence of softer bitumen can further enhance compaction.

5.4.3 Permanent deformation: rutting test

Figure 5.6 shows the rut depths for the studied mixes after 1,000, 3,000, 10,000, and 30,000 loading cycles, with tests conducted at a temperature of 52°C. Sample compaction was regulated by maintaining V_a at a consistent $7 \pm 0.5\%$. There is a clear linear relationship observed between the rut depth and the increase in the content of RAP based on the RBR. The data suggests a strong inverse correlation (with R^2 values ranging from 0.929 to 0.962) between the RBR and the severity of rutting; higher RAP contents correlate with lower rut depths. It's

noteworthy that the MUN-10 mix has no specified criteria for rut depth. All the mixtures in the study maintained rut depths below 10 % after 1,000 cycles and under 15 % after 3,000 cycles, which implies robust performance suitable for the surface layer of pavements. Remarkably, the mix with 100 % RAP showed particularly low permanent deformation, with rut depth staying under 5 % even after 30,000 cycles, a performance surpassing the typical standards set for base layers which are expected to resist rutting more effectively than surface layers. When examining different cycle thresholds, the 60M mix samples often exhibit greater rut depths than the FM mix samples at comparable RBR percentages, suggesting a more mobilized than 60 % and more effective bitumen than FM mixes in the 60M mixes. These observations support the effectiveness of the blending chart in forecasting the permanent deformation behaviour of asphalt mixes.

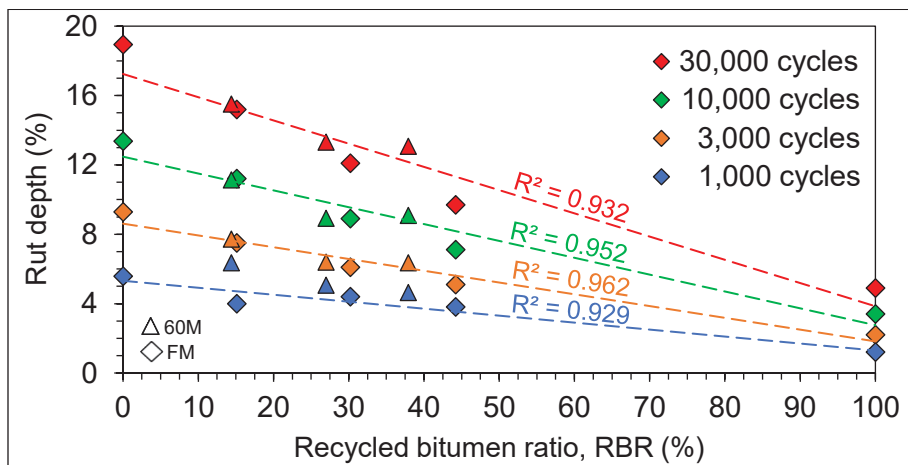


Figure 5.6 Rutting results tested at 52°C (n = 2)
in function of RBR

5.4.4 Linear viscoelastic (LVE) properties: E^* test

Figure 5.7 and Figure 5.8 shows the rheological properties of asphalt mixes FM and 60M respectively, including those with 100% RAP and no RAP, for comparative analysis. Cole-Cole plots and Black space representations (Figures 5.7a, 5.7b, 5.8a and 5.8b) illustrate that the mixes conform to the Time-Temperature Superposition Principle (TTSP), each tracing a

singular, uninterrupted trajectory which signifies thermo-rheological simplicity. Despite some observable scatter, it doesn't interfere with the TTSP's applicability to the mixes.

The 2S2P1D model, calibrated using the parameters from Tableau 5.5 ($T_{\text{ref}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), closely matches the $|E^*|$ values with a maximal discrepancy of up to 10 % across a significant stiffness spectrum, spanning four orders of magnitude. To increase the precision, 100_{FM} mix would need to be tested at higher T to lower the viscosity of the RAP bitumen and observe the behaviour of the aggregates structure, as observe on Figures 5.7a and 5.8a. By testing at higher temperature, the calibration of the rheological model can be refined. In the black space, the phase angles (δ) would decrease at increased temperatures, simplifying the assessment of the static modulus (E_0). Such refinement ensures the model's accuracy in predicting the pavement's performance, especially under high-temperature conditions that may lead to bitumen softening.

The mix with 100 % RAP (100_{FM}) exhibits the least viscous behaviour among the mixes, although it also demonstrates the highest stiffness. This could suggest that it has the highest resistance to deformation (stiffness), but it is also the most brittle material, which is typical characteristic when higher content of aged bitumen is present (Baaj & al., 2013; Krishna Swamy & al., 2011). The significantly higher stiffness values of the 100FM mix at elevated temperatures and low frequencies suggest that the mix is substantially resistant to permanent deformation, like rutting, under these conditions. However, this might also imply that the mix could be more susceptible to cracking at lower temperatures due to its increased stiffness.

Mixtures that blend virgin and recycled bitumen show increased viscous characteristics, as evidenced by elevated phase angles (δ) and higher loss moduli (E_2) in Figure 5.7 and Figure 5.8. The observed trend is that mixes with a blend of virgin and recycled bitumen show increased viscous properties. This suggests that the blending of virgin and recycled bitumen may lead to a mix that has higher ductility and can better absorb energy, which is essential for resisting fatigue and thermal cracking (Tapsoba & al., 2014).

All the 60M mixes exhibit greater viscous and elastic behaviour than their FM counterparts, which contain the same RAP content. The increased total amount of bitumen (P_b) in the 60M mixes likely contributes to their higher viscous properties, particularly noticeable when comparing 15_{FM} to 15_{60M}, 30_{FM} to 30_{60M}, and 45_{FM} to 45_{60M}. As the RAP content increases, the difference in total binder content becomes more evident (Tableau 5.3), especially when comparing mixes with the same RAP content but different degrees of mobilization (FM vs. 60M). This could be due to the added virgin bitumen making the 60M mixes more workable and easier to compact, resulting in a more ductile mix.

On the master curve of $|E^*|$ at 10 °C (figures 5.7c and 5.8c), 100_{FM} is the least affected by the solicitation frequency, primarily due to the effect of aged bitumen from the RAP, which is stiffer than virgin bitumen. Mixes with a combination of virgin and RAP bitumen have $|E^*|$ values between those of the 100_{FM} and the 0 % mix, approaching the 100_{FM} value with an increase in RAP content. 60M mixes exhibit higher $|E^*|$ than FM mixes due to changes in mix properties. As presented on Tableau 5.5, 60M mixes tend to have higher P_{be} and lower V_a , which resulting higher VFB. In terms of master curve of the δ (figure 5.7c and 5.8c), the maximum phase angle (δ_{max}) varies from 42.7° (0 mix) to a peak of 50.2° (15_{60M} mix), with the 100_{FM} mix reaching δ_{max} at 44.0°. As the recycled bitumen content increases, δ_{max} shifts towards a lower frequency. The lowest frequency is observed with the 100_{FM} mix (7.46×10^{-6} Hz), while the highest is with the 0% RAP mix (4.92×10^{-3} Hz), indicating a difference of 3 orders of magnitude. Adding more virgin bitumen into the mixes increases the maximum angle and shifts it towards a higher frequency. All 60M mixes exhibit a higher δ_{max} compared to FM mixes with the same amount of RAP, explained by higher P_{be} and lower V_a .

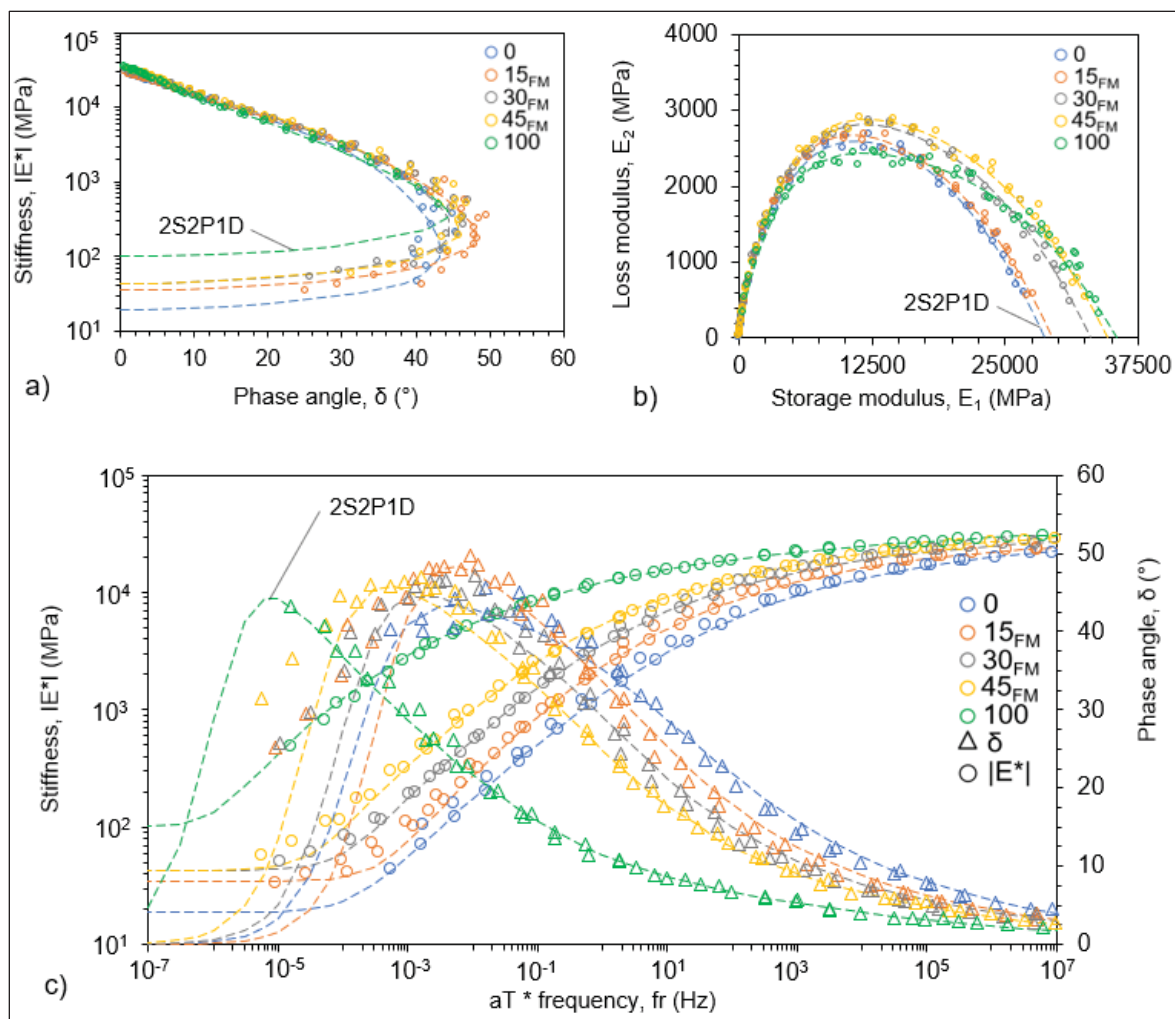


Figure 5.7 Complex modulus results FM mixes (T_{ref} = 10 °C): a) Black space; b) Cole-Cole plan; and c) Master curve of the stiffness $|E^*|$ and phase angle δ

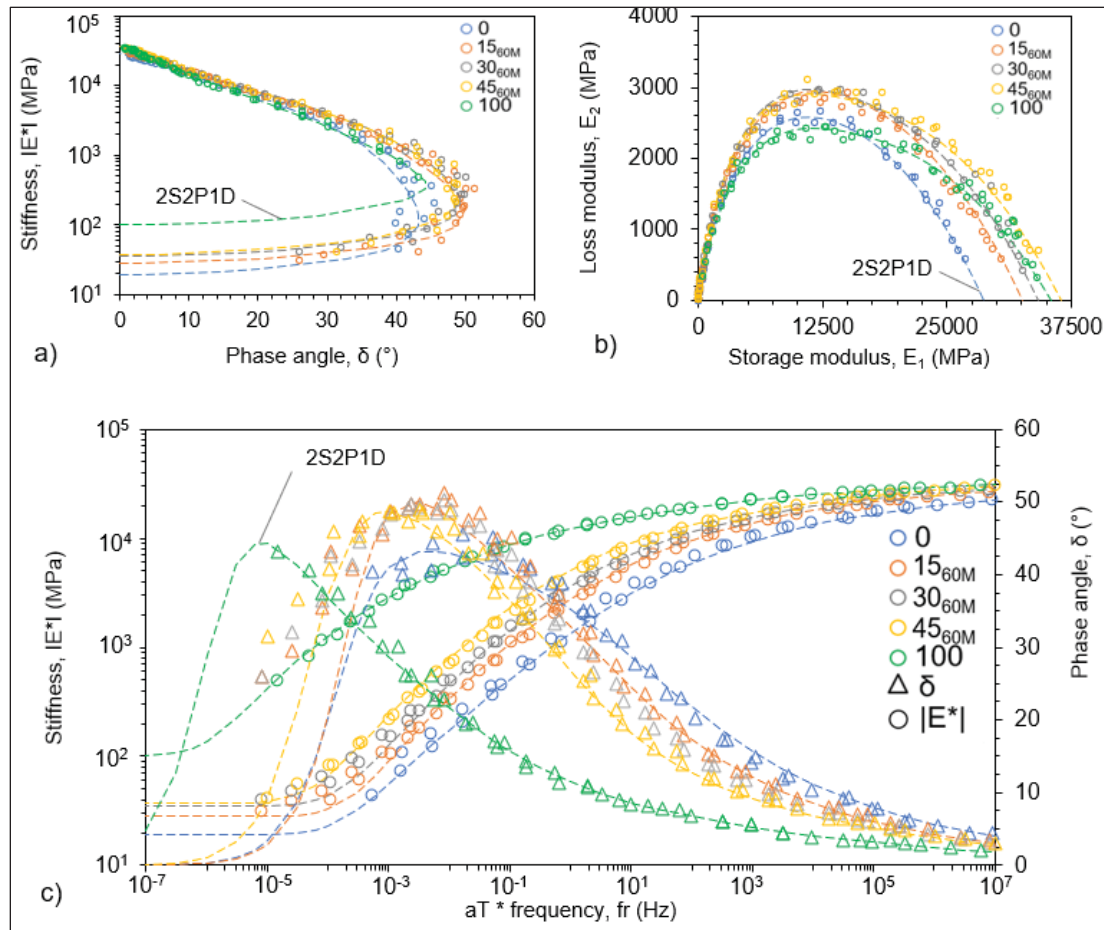


Figure 5.8 Complex modulus results 60M mixes (T_{ref} = 10 °C): a) Black space; b) Cole-Cole plan; and c) Master curve of the stiffness $|E^*|$ and phase angle δ

Tableau 5.5 2S2P1D model parameters and WLF law constants

Mix	2S2P1D parameters							WLF constants ¹		Air voids V _a (%)
(ID)	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	k (---)	h (---)	δ (---)	β (---)	τ_{E0} (s)	C ₁ (---)	C ₂ (---)	
0	19	28,750	7.8	0.500	2.25	1,000	0.000727	39.26	242.54	7.8
15 _{FM}	35	29,500	8.2	0.520	2.20	175	0.003153	23.11	163.66	8.2
30 _{FM}	43	33,100	8.2	0.510	2.28	300	0.007674	22.10	159.13	8.2
45 _{FM}	43	34,600	7.1	0.510	2.30	275	0.024823	26.33	175.17	7.1
100 _{FM}	105	35,555	5.4	0.460	2.40	200	2.339353	24.86	163.40	5.4
15 _{60M}	28	32,555	7.1	0.520	2.20	195	0.004310	20.89	154.28	7.1
30 _{60M}	35	34,250	5.2	0.540	2.29	155	0.007997	22.82	158.71	5.2
45 _{60M}	37	37,000	5.1	0.540	2.45	195	0.020140	19.89	140.74	5.1

¹ T_{ref} = 10 °C.

Using the 2S2P1D model, the stiffness ratio for various asphalt mixes were determined at 10 °C, as illustrated in Figure 5.9 based on the RBR. Figure 5.9 displays the stiffness ratio of each mix at this temperature in comparison to a reference mix with 0% RAP. A notable peak is seen at an extremely low frequency (0.0003 Hz), signifying that the 100FM mix is substantially stiffer (59 times stiffer) than the mix with no RAP at this frequency-temperature couple. The maximal stiffness ratio of the other mixes doesn't exceed 6 times that of the 0% RAP mix, highlighting the effect of adding virgin bitumen. With rising RBR, the stiffness peak also ascends, and the frequency at which this peak occurs shifts to higher frequencies with decreasing RBR. This pattern suggests that RAP-containing mixes exhibit increased stiffness under conditions of slow or stationary loading. When the frequency rises beyond this peak, the stiffness ratio for each mix begins to decline, narrowing the gap with the baseline mix, which implies that the influence of RAP lessens during quicker loading situations. The smaller graph within the figure delineates the stiffness ratio at diverse frequencies for mixes with different RAP contents, indicating a downward trend in the stiffness ratio with an increase in RAP content, particularly at the lower frequencies.

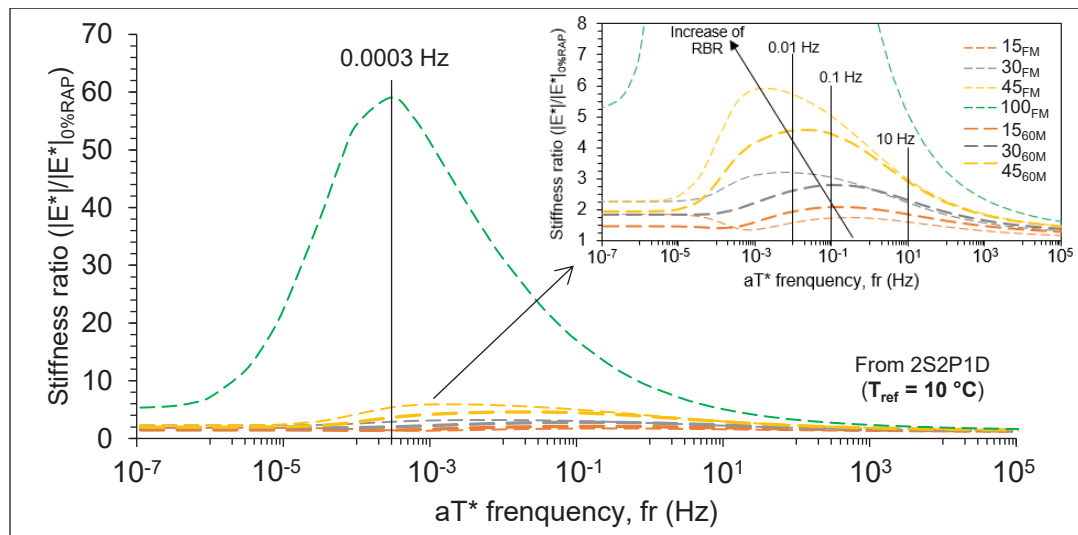


Figure 5.9 Stiffness ratio of mixes based on 0% RAP mix ($T_{ref} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

The phase angle difference ($\Delta\delta$) is plotted against frequency on Figure 5.10 at T_{ref} of 10 °C. The graph reveals that at very low frequencies, there is a pronounced peak in $\Delta\delta$ for the mixes

containing RAP, indicating a distinct deviation in viscoelastic properties from the RAP-free mix under these specific conditions. Notably, the apex for the 100% RAP mix is found at a marginally higher frequency, suggesting a more elastic behaviour compared to mixes with lower RAP content. As we progress to higher frequencies, the phase angle difference diminishes and levels off, pointing to a convergence in the viscoelastic properties of the RAP mixes with that of the 0% RAP mix at these elevated frequencies, mirroring the trends shown in Figure 5.9.

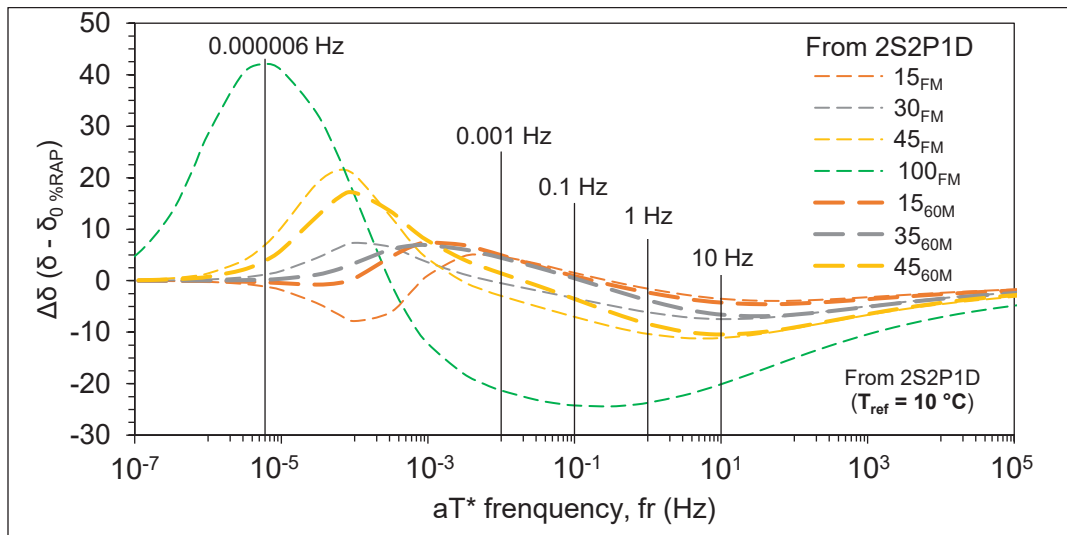


Figure 5.10 Phase angle change ($\Delta\delta$) of mixes based on 0% RAP mix ($T_{ref} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Figure 5.11 presents the stiffness ratio and phase angle difference ($\Delta\delta$) at $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 10 Hz to analyze the effect of the RBR on the viscoelastic properties of the mixes. The data shows a consistent linear increase in the stiffness ratio with RBR, which is corroborated by a strong correlation that persists across other temperature-frequency combinations. The most notable escalation in stiffness is seen in the mix with 100% RAP, which is 5.18 times stiffer than the mix without RAP. The addition of virgin bitumen in mixes with 15% and 30% RAP results in enhanced stiffness, which can be linked to the lower air voids (V_a) and higher voids VFB due to the virgin bitumen's contribution. These two RAP contents exhibit an average stiffness increase of 1.75 and 2.25 times, respectively, compared to mixes devoid of RAP. Mixes with

45% RAP follow a similar upward trend in stiffness, averaging an increase of 3.24 times, in line with the consistent correlation observed with RBR changes.

The phase angle follows a linear trend, decreasing as RBR rises. This trend is particularly pronounced in the 100% RAP mix, which shows a significant 20.3° decrease in the phase angle compared to the mix with no RAP. The findings from Figure 13 underscores the predictability of an asphalt mix's elasto-viscous behaviour based on its RBR, with the stiffness and phase angle of the mixes with 0% and 100% RAP serving as reliable reference points. The correlation coefficients (R^2) of 0.991 and 0.985 for the stiffness and phase angle trend lines respectively, confirm the robustness of these predictions.

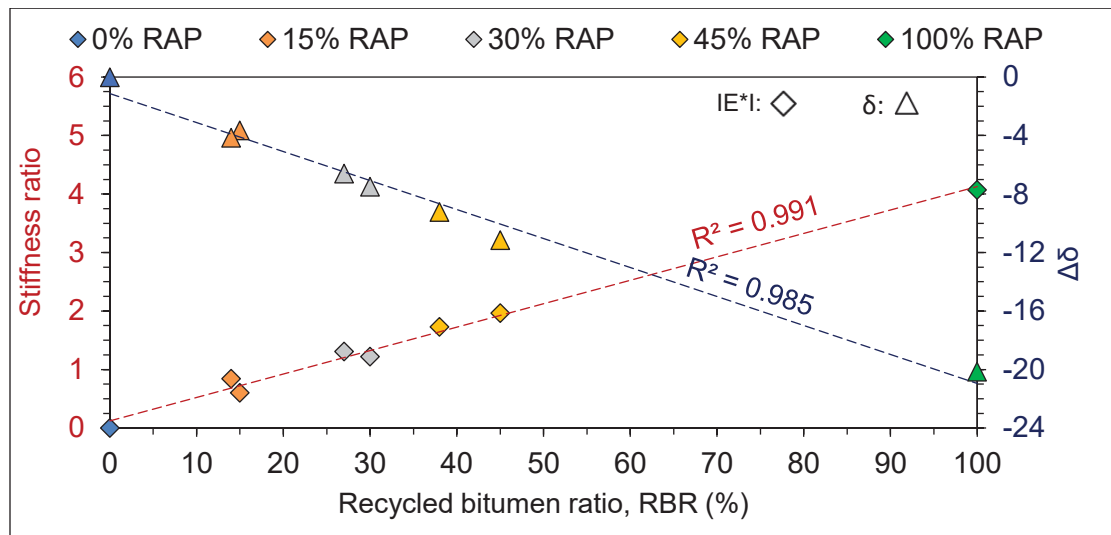


Figure 5.11 Stiffness ratio and phase angle change ($\Delta\delta$) of mixes based on 0% RAP mix (10 °C – 10 Hz)

In conclusion, those figures can be used to understand how the incorporation of RAP affects the mechanical properties of asphalt mixes, which is critical for designing pavements that can withstand real-world loading conditions over time.

5.4.5 Thermal cracking resistance (TSRST test)

Figure 5.12 presents the fractured stress (σ_{fracture}) and the fracture temperature (θ_{fracture}), respectively, for all the mixes. The air voids content (V_a) in the samples mentioned for Figure 5.12 corresponds to the values detailed in Tableau 5.4. In the σ_{fracture} results (Figure 5.12a), σ_{fracture} generally increases with the addition of RAP up to 45% RAP content for both FM and 60M mixes. The 45% RAP mixes exhibit the highest fracture stress, indicating greater resistance to cracking. The 60M mixes consistently show higher fracture stresses than their FM counterparts at the same RAP content, suggesting that the additional virgin bitumen in the 60M mixes may contribute to improved crack resistance. Interestingly, the mix with 100% RAP shows a lower fracture stress than mixes with lower RAP contents, which may be due to the aged nature of the 100% recycled binder possibly being more brittle, reducing the mix's overall ability to resist cracking. No linear correlation is observed based on the RBR, but an overall increase is noted with the increase of RAP and virgin bitumen in the mix. Based on σ_{fracture} , it is not possible to predict the behaviour of the mix or evaluate the degree of mobilization of the RAP bitumen.

On θ_{fracture} values (Figure 5.12b), the low-temperature grading (T_{low}) of the virgin and RAP bitumen are presented with the TSRST values. Typical θ_{fracture} values of TSRST correspond to the low-temperature grading (T_{low}) of the bitumen in the mix, but this is not the case for all the observed results. For mixes with no RAP, samples broke on average at 3.2 °C higher than the PG 52S–34 T_{low} value (–34.9 °C). This suggests that the curing period or a longer mixing time may have affected the thermal cracking resistance of the mix, or other mix properties such as AFT, V_{be} , or 80 $\mu\text{m}/P_{\text{be}}$ could affect the resistance of the materials (Carter, 2002). Most of the mix did not respect the V_{be} Quebec specifications, a sign not enough bitumen is present in mixes (Tableau 5.3). Notably, 15_{60M} and 45_{60M} mixes did not break at a lower temperature than the FM mixes, even though they have more virgin bitumen. Mixes with 15% and 30% RAP (FM and 60M) showed the lowest θ_{fracture} values, better than the mix with no RAP. 45_{FM} and 45_{60M} have shown more variability in the test but performed well with θ_{fracture} lower than –28 °C. A correlation exists where bitumen with a lower T_{low} should, in theory, contribute to a mix

that has a lower (more resistant) θ_{fracture} . RAP aged bitumen is stiffer and more brittle at low temperatures, as observe on viscoelastic behaviour, potentially leading to higher TSRST fracture temperatures (less resistance to cracking). The chart may reflect this if the TSRST fracture temperatures for high RAP content mixes are higher, indicating a lower resistance to low-temperature cracking. However, the mix design, aggregate type, and the interaction between new and RAP bitumen also significantly influence the TSRST fracture temperature.

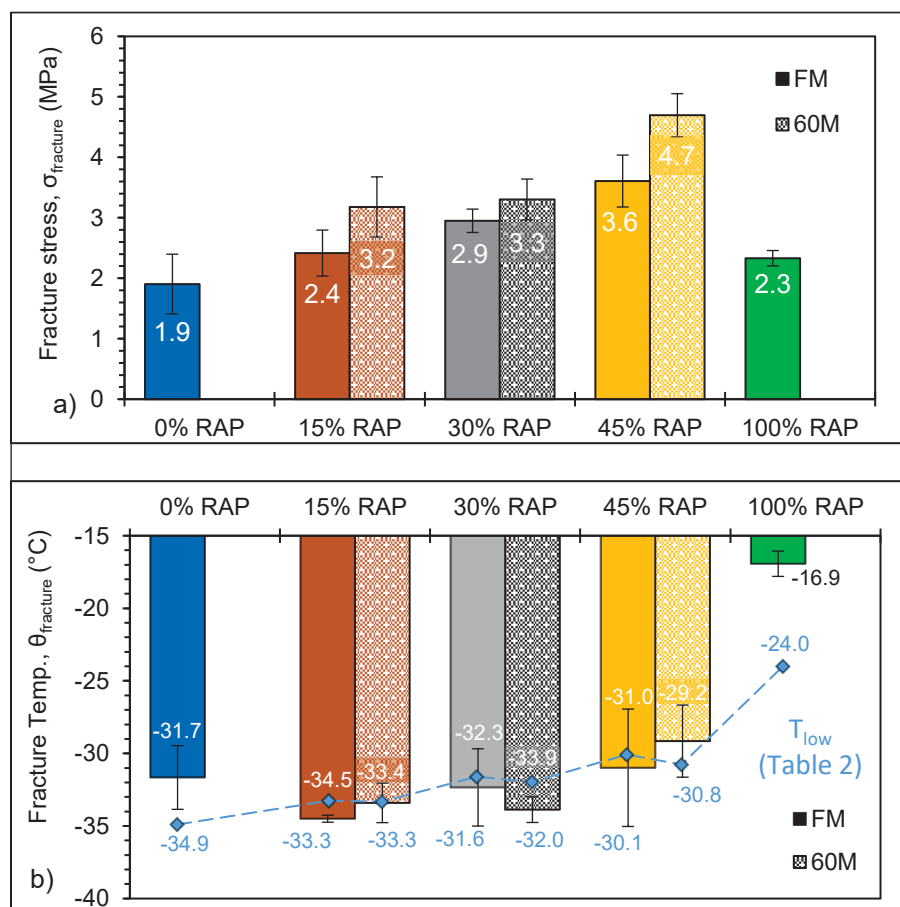


Figure 5.12 TSRST results: a) Fractured stress and;
b) Fracture temperature (n = 3)

Figure 5.13 shows results for FM mixes as an example. Sample conditioning begins at 5 °C, and no relaxation phase has been observed for the three (3) repetitions of the TSRST test with 100 % RAP (100FM). The relaxation slope (slope 1) is significantly higher than that of all the

other mixes, suggesting that the starting temperature may be too high for this amount of RAP, leading to excessive stress evolution during the test. It would be interesting to test those mixes at higher conditioning temperature.

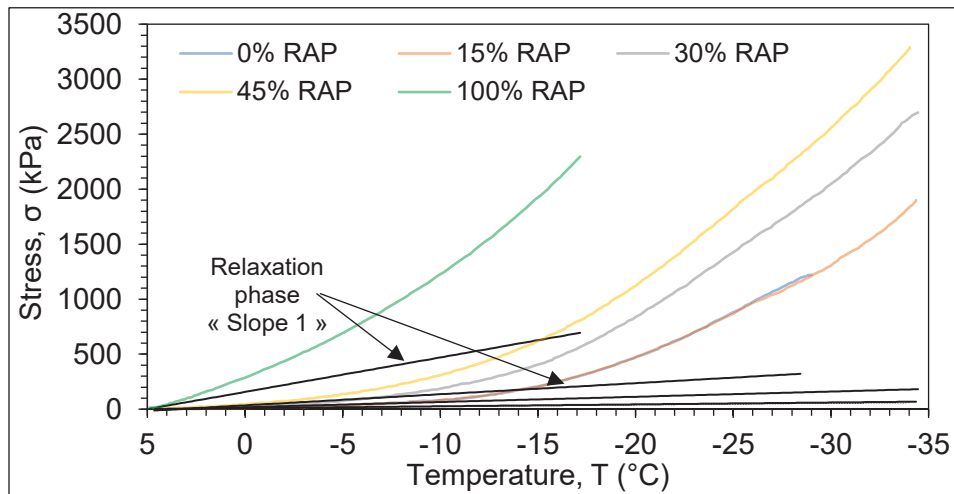


Figure 5.13 TSRST results of FM mixes

5.5 Conclusion

The study aimed to utilize recycled Bitumen Ratio (RBR) parameters as a predictive tool for assessing the behaviour and performance of asphalt mixtures, evaluate the degree of mobilization of the bitumen from RAP, and observe the effect of RAP on mixes with consistent volumetric properties.

The central focus was on varying levels of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) content (0, 15, 30, 45, and 100 %) under two bitumen content scenarios. The first scenario assumed 100 % mobilizable (fully mobilizable: FM) RAP bitumen, while the second assumed 60 % mobilizable (mixes 60M) RAP bitumen based on the total bitumen content of the 100 % RAP mix. Virgin bitumen, a PG 52S–34, has been used to adjust the total amount of bitumen in mixes. Also, the mixes were designed to have a similar particles gradation.

Volumetric properties calculations confirmed that all mixes exhibited similar properties, enabling a focus on the impact of RAP and RBR. The Gmm test demonstrated excellent repeatability, supporting confidence in the obtained values. Results indicated that the study mixes had comparable properties except for 60M mixes whose effective binder percentage (Pbe), effective bituminous binder volume (Vbe), etc. are higher, due to a higher total asphalt binder content (Pb).

In compactability tests using the Superpave gyratory compactor (SGC), an increase in RAP content was found to enhance compactability in hot mix asphalt (HMA). A strong linear trend was observed for mixes containing RAP and similar effective bitumen content (Pbe). Considering 60 % mobilizable RAP bitumen increased mix compactability, as additional virgin bitumen, and softer than RAP bitumen, lubricated the aggregates. Despite all samples being compacted at the same temperature (130 °C), four mixes did not meet MTMD specifications. Results suggested that it is possible to predict mix compactability performance based on RBR.

Rutting performance, evaluated at 52 °C with the French rutting machine, was positively affected by RAP. Linear trend observations based on RBR indicated excellent rutting resistance for all mixes, validating the utility of the blending chart in predicting the permanent deformation performance of asphalt mixes.

Linear viscoelastic (LVE) properties, evaluated with complex modulus tests and 2S2P1D modelling at a reference temperature of 10 °C, showed solid linear trends based on RBR, especially for stiffness ($|E^*|$) and phase angle (δ). These findings validated the blending chart's utility in predicting the viscoelastic behaviour of asphalt mixes.

However, the study found inconclusive results for thermal cracking resistance with Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST). For mixes that contain RAP (15 to 45%), there is a linear trend that correlates with the low temperature grading of the bitumens. Modifications to test parameters are necessary for mixes containing a high amount of RAP. Most mixes broke below -28 °C, except for the 100FM mix, which performed poorly.

This study concludes that solvent extraction of RAP bitumen for performance grading is unnecessary. Performance can be effectively assessed through tests conducted directly on HMA. Upcoming research will concentrate on assessing thermal cracking resistance utilizing two different RAP sources, characterized as good and poor, with enhancements to the TSRST protocol and exploration of additional testing methods. The outcomes will be integrated into a mechanical mix design framework to evaluate the performance comprehensively.

CONCLUSION

La problématique de cette thèse réside dans l'optimisation des interventions routières au Canada par l'utilisation accrue des granulats bitumineux récupérés (GBR), dans un contexte où le maintien d'un réseau routier performant est crucial pour le transport de marchandises et de personnes. L'introduction de GBR dans les enrobés bitumineux présente des avantages économiques et environnementaux significatifs, tels que la réduction de la consommation de ressources non renouvelables et des émissions de CO₂. Cependant, l'incorporation de GBR pose des défis techniques, notamment en raison de leur comportement à basse température et de leur influence sur la durabilité des chaussées. La recherche a donc été axée sur le développement de formulations d'enrobés avec un taux élevé de GBR, en évaluant leur performance à travers un programme expérimental. Les résultats obtenus ont enrichi la compréhension des effets performanciers et thermomécaniques liés à l'ajout de GBR, et ont contribué à l'amélioration des méthodes de formulation afin de maximiser les bénéfices tout en réduisant les risques associés.

Cette thèse a clairement démontré la faisabilité de développer des enrobés contenant un haut pourcentage de GBR à travers trois axes principaux de recherche, chacun contribuant significativement à l'avancement des connaissances sur les GBR, cruciales pour optimiser leur utilisation dans les chaussées au Canada.

Le premier volet a fourni une caractérisation détaillée de huit sources de GBR, montrant des variations significatives de leurs propriétés, même entre échantillons provenant de la même région climatique. Cette phase a également développé une méthode de caractérisation complète, couvrant les granulats et le bitume des GBR, et a exploré la détection de polymères dans le bitume à travers des essais de comportement viscoélastique avec le DSR et de spectroscopie infrarouge par transformée de Fourier (FTIR), apportant ainsi des informations précieuses pour les futures formulations.

Le deuxième volet de cette thèse a exploré l'impact du malaxage en laboratoire sur les propriétés des enrobés contenant 30 % de GBR. Le matériau étudié était un ESG-10 avec un bitume PG 52S-34, type d'enrobé couramment utilisé au Québec pour les couches de roulement. Trois différents types de malaxeurs de laboratoire ont été utilisés, et pour chacun, quatre durées de malaxage ont été testées. Les résultats ont révélé comment le type et le temps de malaxage influencent les performances des enrobés, nécessitant ainsi des ajustements importants dans les méthodes de malaxage actuelles. Cette étude a permis une compréhension approfondie de l'impact des GBR sur les enrobés, essentielle pour garantir leur intégration efficace.

Le troisième volet de cette thèse s'est concentré sur l'évaluation de la performance des enrobés de type MUN-10, utilisés pour les couches de roulement, à divers taux de GBR (0, 15, 30, 45, et 100 %). L'étude a envisagé deux scénarios de mobilisation de bitume provenant des GBR : le premier scénario prévoyait une mobilisation de 100 % du bitume des GBR, tandis que le second considérait que seulement 60 % du bitume était mobilisable, basé sur le contenu en bitume total du mélange à 100 % de RAP. Pour ajuster la quantité totale de bitume dans les mélanges, un bitume vierge de type PG 52S-34 a été utilisé. Les mélanges ont été également conçus pour présenter une granulométrie similaire. Ce volet a non seulement permis de mieux comprendre l'impact du ratio de bitume recyclé (RBR) sur les propriétés des enrobés, mais a aussi introduit une nouvelle méthode pour évaluer ces performances sans recourir à l'extraction par solvants, favorisant une démarche plus respectueuse de l'environnement. De plus, l'exploitation de la charte de mélange a été explorée en tant qu'outil potentiel pour prédire le comportement des enrobés.

La variabilité des propriétés du bitume issu des GBR souligne la nécessité d'élargir les méthodes de caractérisation actuelles. Malgré une provenance commune de zones climatiques similaires où les grades de performance similaire sont en vigueur, le bitume extrait du GBR affiche une diversité de propriétés. Les GBR et les granulats correspondants présentent des densités et des distributions granulométriques comparables dans les catégories 0/10 et 0/20. Les propriétés du bitume extrait des GBR sont typiquement celles de matériaux vieillis, se

caractérisant par une consistance plus dure (pénétration plus faible) et des températures de malaxage et de compactage plus élevées, tout en offrant une plus grande rigidité à haute température, mais des performances diminuées à basse température. Les résultats de l'essai MSCR révèlent que la plupart des bitumes GBR frôlent les seuils de critères de récupération élastique ($R_{3,2}$), ce qui est attendu pour des bitumes vieilliss. Les essais de viscoélasticité linéaire (VEL) effectués avec le DSR, utilisant trois différentes géométries de spécimens (4, 8 et 25 mm), ont mis en évidence le comportement viscoélastique du bitume GBR sur un large spectre de températures et de fréquences. Les résultats des essais de module en cisaillement complexe (G^*) ont aussi suggéré la présence de polymères dans certains bitumes GBR, une observation supportée par les variations dans les données de comportement viscoélastique. L'utilisation des modèles WLF et 2S2P1D se sont avérées précises pour prédire le comportement des bitumes des GBR sous diverses conditions. Les analyses par spectroscopie infrarouge par transformée de Fourier (FTIR) ont été particulièrement utiles pour évaluer le vieillissement et l'oxydation du bitume, avec des échantillons de GBR montrant des signes d'oxydation plus marqués que le bitume vierge. La corrélation entre les résultats FTIR et les propriétés thermiques du bitume accentue le rôle du FTIR dans la prédiction des performances des matériaux. En effet, l'indice de sulfoxyde (SI) et l'indice de longues chaînes (LCI), ayant des écarts types faibles, se sont révélés être des indicateurs clairs pour distinguer les bitumes des GBR des bitumes vierges parmi tous les indices évalués. Globalement, les essais VEL et FTIR se sont démarqués comme une méthode efficace pour l'analyse de qualité et la caractérisation du bitume. Ces découvertes mettent en lumière l'importance d'une caractérisation approfondie pour pleinement apprécier l'étendue des propriétés des GBR.

L'étude a démontré que le type et la durée de malaxage influencent significativement les propriétés volumétriques, la compactabilité et les performances mécaniques des mélanges. Une série d'essais, incluant la mesure de la densité maximale (D_{mm}), la teneur en bitume, l'analyse granulométrique, la compaction à la presse à cisaillement giratoire *Superpave* (PCG) et marteaux Marshall, l'*Indirect Tensile Strength* (IDT), l'*Indirect Tensile Stiffness Modulus* (ITSM) et le *Cracking Tolerance Index* (CT_{index}), a été réalisée. Les résultats ont révélé que la densité maximale et les vides dans les mélanges diminuent généralement avec l'augmentation

du temps de malaxage. Les malaxeurs thermorégulés (TR) atteignent un point de stabilité après une certaine période de malaxage. Par ailleurs, la proportion de particules passant le tamis de 80 μm augmente avec le temps de malaxage pour tous les types de malaxeurs, les malaxeurs Hobart (HB) et Pug Mill (PM) ayant un impact plus marqué sur ces propriétés. Augmenter le temps de malaxage améliore la compactabilité du matériau, facilitant ainsi son application sur site. Les vides obtenus avec la méthode Marshall (40 coups de chaque côté) sont généralement inférieurs à ceux obtenus avec le compacteur PCG à N_{design} , les malaxeurs HB et PM ayant un effet plus prononcé sur la compactabilité.

Les propriétés mécaniques des enrobés sont davantage influencées par les conditions de malaxage que par les vides. Les vides ont un impact plus important sur la rigidité des mélanges dans les essais ITSM à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, bien que d'autres facteurs tels que les propriétés volumétriques des mélanges et la mobilisation du bitume des GBR affectent également la rigidité. Dans les essais IDT, la rigidité est influencée par le type de malaxeur et le temps de malaxage, sans corrélation observable avec les vides. Le CT_{index} montre de bons résultats à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais aucune résistance à la fissuration n'est observée à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en raison de la fragilité de l'enrobé. L'analyse statistique ANOVA indique que les résultats ITSM sont fortement impactés par le temps et le type de malaxage. Les données suggèrent qu'à mesure que la température augmente, le temps de malaxage a un effet plus marqué sur l'ITSM et d'autres paramètres de performance, ce qui signifie qu'à des températures d'utilisation plus élevées, le temps de malaxage influence davantage la rigidité et la résistance de l'enrobé.

Les résultats de cette étude soulignent l'importance de choisir le temps et le type de malaxage pour obtenir des enrobés conformes aux spécifications et résistants à la fissuration. L'impact des vides sur les propriétés des mélanges a aussi été mis en évidence, montrant que les vides peuvent significativement affecter les caractéristiques du mélange. D'autres éléments, comme la concentration en particules fines, influencent également la performance du mélange. Un temps de malaxage prolongé tend à produire davantage de particules fines, améliorant la compactabilité du mélange. Il est donc crucial de prendre en compte la génération de ces particules fines pour garantir que le mélange réponde aux spécifications. Dans la formulation

d'enrobé, il pourrait être avantageux de cibler des points de contrôle inférieurs au maximum autorisé après le temps de malaxage.

Dans le troisième volet de cette thèse, l'analyse des propriétés volumétriques a révélé que tous les mélanges possédaient des caractéristiques semblables, ce qui a permis de concentrer l'attention sur l'impact des GBR et du RBR. Les résultats ont montré que les mélanges avaient des propriétés comparables, à l'exception des mélanges 60M où le pourcentage de bitume effectif (P_{be}) et le volume de bitume effectif (V_{be}) étaient supérieurs, du fait d'une teneur globale en liant bitumineux plus élevé (P_b). Les essais de compactabilité, réalisés avec une PCG, ont démontré qu'un accroissement du GBR dans les enrobés améliorait la compactabilité. Une relation linéaire marquée a été observée pour les mélanges contenant du GBR avec un P_{be} similaire. L'hypothèse selon laquelle 60 % du bitume des GBR était mobilisable a amélioré la compactabilité du mélange, le bitume vierge ajouté, moins visqueux que celui des GBR, facilitant la lubrification des agrégats. Bien que tous les échantillons aient été compactés à la même température (130 °C), quatre mélanges n'ont pas respecté les spécifications MTMD. Les résultats suggèrent qu'il est possible de prédire la performance de compactabilité des mélanges en fonction du RBR. La résistance à l'orniérage, évaluée à 52 °C, a été positivement influencée par le GBR. Les analyses des tendances linéaires basées sur le RBR ont montré une excellente résistance à l'orniérage pour tous les mélanges, confirmant l'efficacité du tableau de mélange pour prédire la déformation permanente des mélanges d'enrobé. Les propriétés viscoélastiques linéaires (LVE), mesurées via des essais de module complexe et la modélisation 2S2P1D à une température de référence de 10 °C, ont révélé des tendances linéaires solides basées sur le RBR, en particulier pour la rigidité ($|E^*|$) et l'angle de phase (δ). Ces observations ont validé l'utilité de la charte des mélanges pour anticiper le comportement viscoélastique des mélanges d'enrobé.

Cependant, l'étude a produit des résultats non concluants concernant la résistance à la fissuration thermique lors des essais de retrait thermique par déformation empêchée (TSRST). Pour les enrobés contenant du GBR (de 15 à 45 %), une tendance linéaire a été observée, corrélant avec la classification à basse température des bitumes, selon la charte des mélanges

des bitumes. Des ajustements des paramètres de l'essai sont nécessaires pour les mélanges contenant une grande quantité de GBR. La majorité des mélanges ont montré des ruptures en dessous de -28 °C, à l'exception du mélange à 100 % de GBR qui a sous-performé. Cette étude conclut que l'extraction par solvant du bitume RAP pour la classification de performance peut être évitée et la performance peut être évaluée efficacement à travers des essais menés directement sur l'enrobé.

Ces trois volets de la thèse ont établi une fondation solide pour le développement durable des infrastructures routières par l'intégration des GBR. Les résultats montrent que l'utilisation efficace de proportions élevées de GBR est possible, à condition d'ajuster précisément les formules et les méthodes de malaxage. L'introduction de critères de performance dans les méthodes de formulation, incluant les standards pour les tests TSRST, répond aux exigences spécifiques des infrastructures routières en Amérique du Nord. Cette recherche pave la voie à de futures études visant à perfectionner les normes de formulation et à promouvoir l'utilisation des GBR au Canada. Les efforts futurs devraient continuer à explorer ces aspects pour optimiser l'utilisation des GBR tout en assurant la durabilité et la performance des chaussées. Cette thèse démontre que, malgré les défis, il est viable d'augmenter significativement l'utilisation des GBR dans les enrobés au Canada. Pour cela, une méthode spécifique de formulation et de caractérisation, adaptée aux conditions climatiques canadiennes et aux particularités des GBR, est nécessaire. Ces travaux encouragent des pratiques plus durables dans la construction et la réhabilitation des chaussées, contribuant à une industrie routière plus écologique et économiquement avantageuse. Une attention particulière doit être portée à la caractérisation des GBR, surtout quand leur teneur dépasse 20%, et l'adoption d'une approche basée sur la performance pour le comportement des enrobés est essentielle.

RECOMMANDATIONS

À partir des conclusions de cette étude, les suggestions suivantes sont émises pour orienter les recherches futures :

- 1) Trop de couples fréquences-température ont été testés lors des essais de viscoélasticité linéaire (VEL) des bitumes. Il est envisageable de diminuer le nombre de fréquences testées à chaque température. Cette réduction contribuerait à diminuer la durée des essais. L'emploi d'un diamètre de 4 mm s'est avéré efficace pour améliorer la modélisation du comportement viscoélastique.
- 2) Dans le cadre de la caractérisation du GBR, il serait pertinent d'inclure des essais sur le GBR compacté, tels que des essais de compactabilité, de résistance à l'eau, de module en traction-compression, et de retrait thermique (TSRST).
- 3) Concernant la formulation d'enrobés bitumineux à fort taux de GBR, il est crucial d'intégrer des critères de performance pour les basses températures. À cet effet, l'essai TSRST est approprié sans modification pour des teneurs en GBR inférieures à 50%.
- 4) Les résultats de l'essai TSRST pour l'enrobé contenant uniquement du GBR (MUN-10 R100) ne sont pas concluants en raison de l'absence de la phase de relaxation. Il est donc nécessaire d'ajuster la méthode d'essai afin de relier les caractéristiques à basse température du bitume des GBR aux résultats de l'essai TSRST.
- 5) Cette thèse a démontré que le malaxeur thermorégulé (TR) influence le moins la granulométrie de l'enrobé, tout en assurant une meilleure homogénéité entre les bitumes vierges et ceux issus des GBR. Pour les futures études en laboratoire sur les enrobés à chaud avec un fort taux de GBR, il est recommandé de privilégier le malaxeur TR avec un temps de malaxage prolongé.
- 6) Il serait judicieux de se concentrer sur le procédé de fabrication en usine, en mettant l'accent sur les paramètres de fabrication tels que les températures, le temps de malaxage, le type de malaxeur, et la teneur en humidité des GBR. Il serait également pertinent de comparer les performances des enrobés à fort taux de GBR fabriqués en usine avec ceux fabriqués selon la même formule en laboratoire.

ANNEXE I

IMPACT OF MIXER TYPE AND MIXING TIME FOR HOT MIX ASPHALT WITH HIGH RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT CONTENT ON MIX PERFORMANCE

Marc-André Bérubé^a, Kevin Bilodeau^b, Alan Carter^a

^{a,c} Department of Construction Engineering, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

^b Bauval Inc.
210 Bd De Montarville, Boucherville, Québec J4B 6T3

Article présenté à la 66^e conférence annuelle de « *Canadian Technical Asphalt Association* »
, novembre 2021

A I.1 Abstract

The mixing process in the laboratory is directed by standards. Those standards make recommendations and present some limits. The influence of the laboratory technique to produce asphalt mixes affects the properties and performance of the mixes. Different mixers that produce different mixing energy that are used for different mixing time are considered acceptable, and those variations affect the materials. The same effect occurs on the asphalt plant. It could have major impact on aggregates and asphalt mix properties, on the bitumen oxidation, and on the compaction. This paper presents the effect of the mixing process in laboratory for Hot-Mix Asphalt (HMA) with high content of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Three types of mixers have been used for this research project. For all the mixes, the mixing temperature, the compaction temperature and the virgin asphalt cement type remain the same. For each mixer type, four mixing times were selected based on the mixer properties. All the mixes were firstly tested for their compaction ability with the Superpave Gyratory Compactor (SGC). The stiffness of bituminous mixture was also evaluated with dynamic tests (waves propagation) and indirect tensile modulus tests (ITSM). According to the results, voids during the SCG compaction have changed with the mixing time for all mixer types and all

gyrations. A translation based on the mixing time between the different curves has been observed. For stiffness, results changed through the mixing time and an optimum was obtained for each mixer type.

A I.2 Introduction

A very large proportion of the transportation of goods and people in Canada is carried out via the road network. It is therefore essential to maintain this network in the best possible condition by optimizing interventions, whether from a financial or a technical point of view. It is even more important to ensure that the work done on the roadways is done in a spirit of sustainable development. It is with this in mind that the use of recycled materials, such as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), is increasingly used in asphalt mixes. However, it is not currently possible to use large quantities of recycled asphalt in asphalt mixes because of a lack of knowledge on the subject, and because of a fear regarding performance and workability behaviour of asphalt containing RAP. Canada's road network is the seventh largest in the world with just over 1,000,000 km (PIARC, 2015). Approximately 95 percent of paved roads are asphalt pavements. According to the Canadian Infrastructure Report, over 25 percent of municipal roads are in a condition considered fair, poor or very poor (BRIC, 2016). No such data is available for roads under provincial jurisdiction in Canada. However, statistics are available for some provinces. For example, Transport Quebec estimates that only 21 percent of its roads are in poor condition (MTQ, 2016).

On-road experience and laboratory research have demonstrated the benefits of using RAP. The use of RAP provides substantial cost savings, and lessens the environmental footprint of pavements. However, the current laboratory mixing methods for RAP mixes given by the transport agencies are not adapted for high RAP content. In this paper, the mix design methods of HMA with high RAP content and some modifications on Quebec LC method will be discussed. Then, ESG-10 mixes with 30 percent RAP produced with three laboratory mixers type and different mixing times will be compared in terms of compact-ability and stiffness.

A I.3 Background

RAP is old asphalt recovered from road demolition/rehabilitation. Despite the fact that road reached its end-of-life condition, the aggregate and bitumen still have very useful characteristics. The use of RAP in new mixes has financial repercussions beneficial to companies and also reduces the use of raw material, thus it is beneficial to the environment. The use of recycled asphalt aggregate is challenging because of the variability of its properties, the properties of the aged and oxidized bitumen that envelops the aggregate. RAP affects the volumetric and mechanical properties of an asphalt mix, such as intergranular voids, workability and stiffness (McDaniel & Anderson, 2001).

In order to design an asphalt mix with RAP content that can be used in Quebec, the LC mix design method is used. Formulated by the pavement laboratory of the Ministère des Transports du Québec (MTQ), this method, based on the Superpave method and the method of the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) from France, sets an effective bitumen volume (V_{be}) according to the mix to be formulated and optimizes the grading of the mix to reach voids specifications (V_i) according to a given compaction energy (MTQ, 2020). A too low V_{be} could be an indication of poor-quality material. Voids are evaluated with the Superpave Gyratory Compactor (SGC) at three specific gyrations: N_{ini} , N_{des} and N_{max} . N_{ini} represents the asphalt mixture at the exit of the paver, N_{des} represents the asphalt mixture at the end of the roller compaction and N_{max} represents the asphalt mixture at the end of its life after the traffic compaction. In Quebec, N_{ini} is 10 and N_{max} is 200. N_{des} varies is 80, 100, or 120 depending on the aggregate biggest size in the mix. Those value are different from the superpave method, which are depending on Equivalent Single Axle Load (ESAL) and traffic level. In this study, N_{ini} is 10, N_{des} is 80 and N_{max} is 200.

To have a better understanding of the behaviour during the compaction process, the densification curve is plotted and analyzed (Chen & Li, 2013, Leiva, Fabricio & Randy, 2008). To create the densification curve, the height of the specimen at each gyration is recorded and the bulk volume density is calculated with the Equation A I.1 and the degree of compaction is calculated with Equation A I.2:

$$\rho = \frac{\rho_b}{m_0/(\pi r^2 h_t)} \cdot \left(\frac{m_0}{\pi r^2 h} \right) \quad (\text{A I.1})$$

Where: ρ is the bulk specific gravity;
 ρ_b is the bulk specific gravity at 80 gyrations;
 m_0 is the dry weight of the specimens (g);
 r is the specimen radius (7.5cm); and
 h_t is the specimen height at 80 gyrations (cm).

$$\rho = \frac{\rho_b}{m_0/(\pi r^2 h_t)} \cdot \left(\frac{m_0}{\pi r^2 h} \right) \quad (\text{A I.2})$$

Where: γ is the degree of compaction (%);
 G_{mm} is theoretical maximum specific gravity of the asphalt mixture.

The values from 10 to 80 gyrations are introduced on a semi logarithmic plot (degree of compaction in function of gyration numbers). Data analysis includes the curve's slope, the number of gyrations required to reach 92 percent G_{mm} , the percentage of the maximum theoretical specific gravity ($\%G_{mm}$) at the initial number of gyrations ($N_{initial}$) ($\%G_{mm}$ at N_{ini}) and the Compaction Energy Index (CEI). All those parameters explain moreover the workability of the asphalt mix during the compaction. If the number of gyrations to reach 92 percent is too high, some difficulties to reach the aimed voids could happen on the field during the construction compaction. $\%G_{mm}$ at N_{ini} show the initial workability. A higher value indicates that the initial workability is improved and the compaction energy to reach the aimed voids should be lower. The CEI represents the energy required by the roller to achieved 92 percent of G_{mm} and is the area under the densification curve from N_{ini} to N_{des} as shown on Figure A I.1.

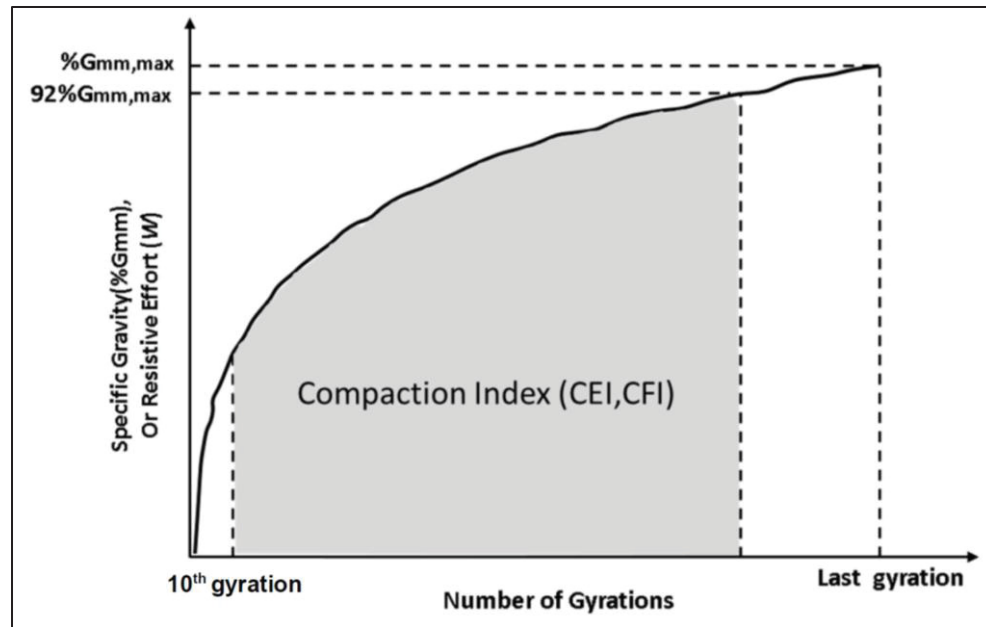


Figure A I.1 Compaction Energy Index
Adapted from Leiva & al. (2008)

The lower this value is, the easier the compaction will be in the field. The compaction slope is an indication of the speed on densification during the compaction process and the formula is presented on Equation A I.3.

$$\text{slope} = 100 \cdot \frac{\%G_{mm} \text{ at } N_{des} - \%G_{mm} \text{ at } N_{ini}}{\log(N_{des}) - \log(N_{ini})} \quad (\text{A I.3})$$

Where: $\%G_{mm}$ at N_{des} (80) is the level of compaction achieved at the design number of gyration (%); and

$\%G_{mm}$ at N_{ini} (10) is theoretical maximum specific gravity of the asphalt mixture.

Many parameters such as the compaction temperature, the particle size distribution of the aggregates and the asphalt content affect the compact-ability. Higher binder content will facilitate construction compaction. The compaction slope value, the $G_{mm}\%$ at N_{ini} should be higher and the number to reach 92 percent of G_{mm} and the CEI should be lower. Those values are not used for requirement specifications, but help to have a better understanding of the

workability of the mix during the compaction process. The incorporation of RAP in mixtures is currently possible in Quebec, but limited to 20 percent for base courses and 10 percent for surface courses managed by the MTQ. However, cities like Montréal and Québec allow up to 50 percent of RAP. Considering that 100 percent of the bitumen from RAP is available in the calculations, the percentage of added bitumen in the mix will vary according to the RAP content (Gandi, 2018). In addition, when selecting the virgin bitumen, it must be taken into consideration that the recycled bitumen is aged and oxidized, which makes it a very stiff material. In order to counteract this stiffness, it is recommended to use a softer bitumen to counterbalance the RAP bitumen. Overall, it is not suggested to change the virgin binder if RAP content is under 15 percent of the total weight of the aggregates. Between 15 and 25 percent, the Performance Grade (PG) of the virgin binder should be lowered by 1 grade. Over 25 percent, the blending chart is used to determine the final PG of the asphalt mix. It is considered that the properties of the bitumen in an asphalt mix vary linearly with the percentage of bitumen added to the mix, the mixing and compaction temperature should vary linearly as well. The use of a temperature chart works the same way as a mix design chart, the more recycled bitumen in the mix, the higher the mixing temperature must be to allow the bitumen to mobilize. Thus, the temperature chart is in function of the Recycled Bitumen Ratio (RBR) and not by the percentage of RAP (Filonzi, Lee, Haji, Hazlett & Bhasin, 2020). The RBR is calculated with the Equation A I.4.

$$\rho = \frac{\rho_b}{m_0/(\pi r^2 h_t)} \cdot \left(\frac{m_0}{\pi r^2 h} \right) \quad (\text{A I.4})$$

Where:

- RBR is the recycled binder ratio (%);
- $P_{b, RAP}$ is the RAP percentage of bitumen by the total weight of the RAP;
- P_{RAP} is the percentage of RAP content by the total weight of the asphalt;
- $P_{b, Total}$ is the specimen radius (7.5cm).

Figure A I.2 shows an example of a blending chart used to determine the mixing and compaction temperatures in function of RBR. In this example, if you have a RBR of 27 percent, the mixing and compaction temperature will increase, respectively, to 135 and 145 °C instead

of 125 and 135 °C for the virgin mix (no RAP) (Carter, Donovanm MacInnis & Strynadka, 2018).

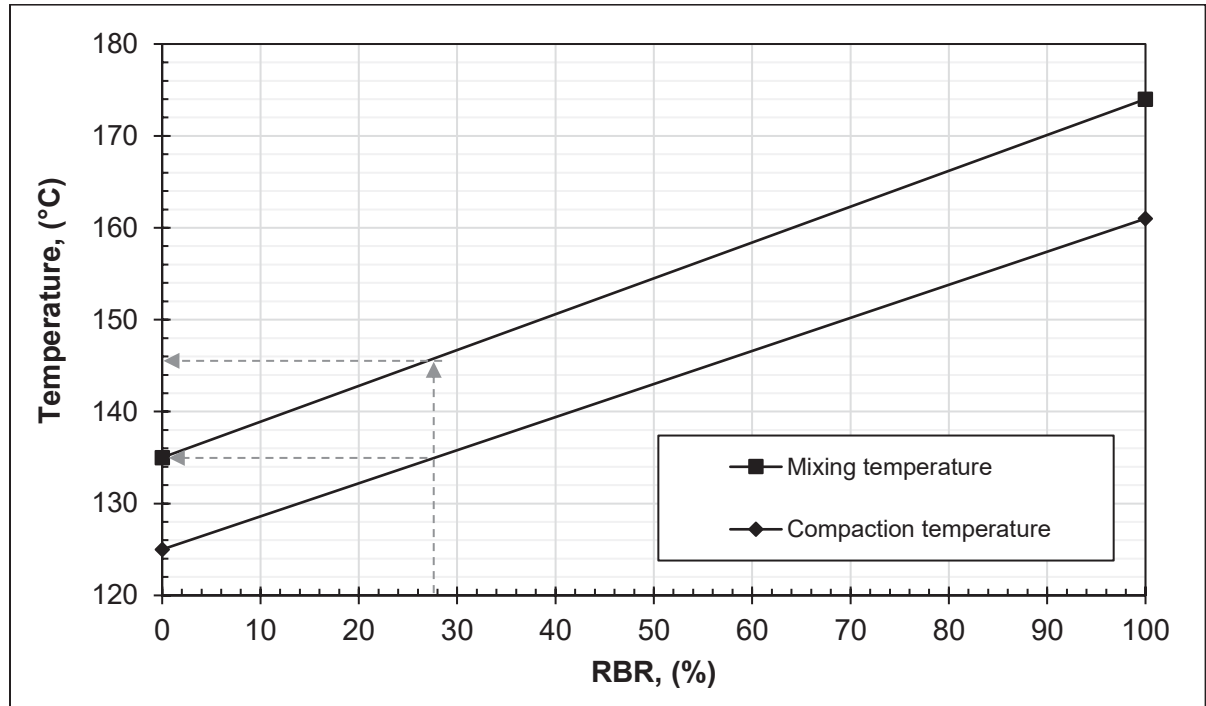


Figure A I.2 Blending Chart of the Studied Mix

Mixing time and temperature have an impact on the homogenization of the bitumen in the RAP and the virgin bitumen. The more preheated virgin aggregates are mixed with RAP, the more the bitumen in the latter is mobilized. Thus, virgin aggregates preheated to a higher temperature than the RAP allows the transfer of this thermal energy to the latter and thus, soften the old oxidized bitumen. The MTQ suggests to heat the RAP at maximum temperature of 60 ± 5 °C in a draft oven or using a microwave to heat it at $100^\circ\text{C} \pm 5$ °C. Afterwards, the incorporation of the virgin bitumen in the mixer allows to finish the temperature increase of the RAP and to mobilize the recycled bitumen. In this sense, the longer the mixture is mixed, the more the RAP bitumen is activated and distributed evenly in the mix (Nguyen, 2019). Any type of mixer that give a homogeneous and well-coat mixture within 2 to 3 minutes can be used. For HMA without RAP, the MTQ gives a reference time of around 40 seconds for a countertop mixer and around 3 minutes for a thermo-regulated mixer.

Due to the thermo-sensitive properties of bitumen, temperature causes the asphalt stiffness to change. The lower the temperature, the stiffer the asphalt and the more brittle it may behave due to the low temperature properties of the bitumen (Di Benedetto & Corté, 2005). Conversely, the asphalt softens with increasing temperature. A non-destructive method is proposed to determine the dynamic stiffness modulus using an indirect tensile test based on NF EN 12697-26:2012 standard (annexe C), the Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM). Ten impulsions are done with MTS press on a Marshall samples conditioned at testing temperature for four hours before testing and the horizontal strains are measured. The stiffness modulus is calculated with Equation A I.5.

$$ITSM = \frac{F \cdot (0,27 + \nu)}{h \cdot z} \quad (\text{A I.5})$$

Where:

- ITSM is the measured stiffness modulus (MPa);
- F is the peak value of the applied vertical load (N);
- z is the amplitude of the horizontal deformation (mm);
- ν is the Poisson's ratio (0.35 from standard); and
- h is the mean thickness of the specimen (mm).

Another non-destructive fast test to measure the dynamic stiffness is with wave propagation. This test is based on the measure of the Frequency Response Function (FRF) of a bituminous mixture specimen on free boundary condition (Carret, Di Benedetto & Sauzeat, 2020, Di Benedetto, Sauzéat & Sohm, 2009). The test consists to create an impact with a hammer equipped with a load cell to record the impulse signal. The vibration of the impact is recorded with an accelerometer. The recorded values are in time domain and they need to be transformed into the frequency domain signals to calculate the FRFs. To transform the data, the Fast Fourier Transform (FFT) is used. An average of 5 impacts is recorded. At low temperature and high frequency, bituminous material tends to act as pure elastic behaviour.

A I.4 Materials and methodology

To study the impact of mixer type and mixing time, a single mix design with 30 percent RAP was produced with three different mixers and different mixing time. The produced mixes were tested for their volumetric properties and their stiffness with ITSM and wave propagation.

All the mixes have the same components (asphalt content type and quantity, particle size distribution, RAP content, and aggregate sources). The asphalt mix type selected is a Quebec surface mix called ‘Enrobé Semi-Grenu’ (ESG-10), a dense-grade 10-mm asphalt mix, which is the most common surface mix produced. Particle size distribution of the mixes is shown on Figure A I.3.

All the mixes have the same amount source of RAP, which is 30 percent by weigh of the aggregates mass. The percentage of bitumen of the RAP is 5.06 percent by weight of the total mass of the RAP. By considering that 100 percent of the RAP binder is available, 30 percent of RAP represents a binder content of 1.5 percent by weight of the total mass of the HMA. To counteract the effect of the oxidized RAP binder, a softer virgin bitumen (PG 52S-34) is used. The virgin bitumen content is 4.1 percent by weigh of the total mass of the HMA, for a total binder content of 5.6 percent.

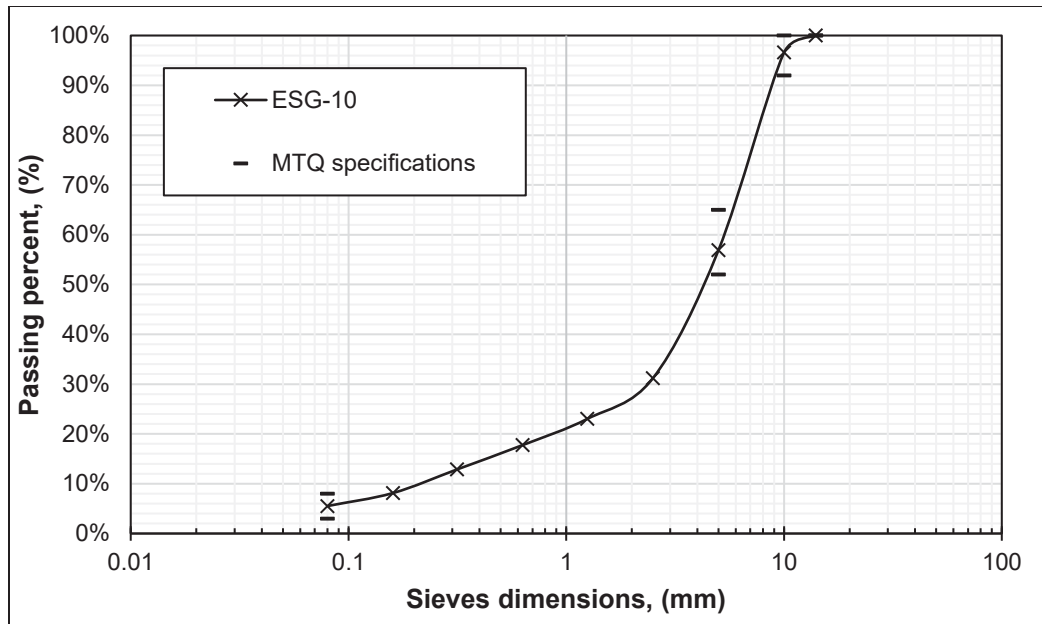


Figure A I.3 Particle Sizes Distribution of ESG-10 Mixes

Tableau A I.1 shows the properties of the extracted binder of the RAP and the virgin binder. The Recycled Binder Ratio (RBR) equals 27 percent. To determine the mixing and compaction temperatures, the blending chart was use with the RBR, as shown on Figure A I.2. Mixing and compaction temperatures selected are 145 and 135°C, respectively.

Tableau A I.1 Virgin and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Binder Properties

Test	Units	Standard	Results	
			RAP Extracted Binder*	Virgin Binder
High Temperature Grading	°C	AASTHO T315	84.0	52.7
Low Temperature Grading	°C	AASTHO T313	-24.0	-34.9
Performance Grade (PG)	-	-	PG 82-22	PG 52S-34
Mixing Temperature	°C	AASTHO T316	174	136
Compaction Temperature	°C	AASTHO T316	161	125
* Extracted with trichlorethylene (TCE)				

In this study, three different types of mixers were used. The first one is the countertop mixer (HB), the most commonly used in laboratory. The second one is a laboratory pugmill mixer (PM), which is usually used for cold mixes in laboratory. Large scale pugmill mixer are common in asphalt plants to produce HMA. This could mean that the mix from that mixer is more representative. The last mixer is a thermoregulated mixer (TR), a temperature and speed-controlled mixer. Tableau A I.2 shows the temperatures of each component for each type of mixer. Aggregates were heated in a draft oven at the mixing temperature the night before the mixing day, for all mixers. Virgin bitumen heating started 3 hours before the mixing and temperature was checked before its use. For the HB and PM mixers, the aggregates were overheated to reach the mixing temperature and limit the oxidation of the RAP, which is the method used at the asphalt plant. Temperature was recorded throughout the mixing process with an infrared thermometer. For the TR mixer, all the components were at the mixing temperature. RAP for the TR mixer was conditioned at 60°C the night before the mixing day and then raised to the mixing temperature right before mixing.

Tableau A I.2 Mixing temperatures

Mixer Type	Virgin Binder Temperature (°C)	Aggregate Temperature (°C)	Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Temperature (°C)
Countertop HB	145	185	60
Pug Mill PM	145	185	60
Thermoregulated TR	145	145	145*
* RAP was at 60°C the day before the mixing and then transferred at 145°C until temperature is reached			

For each mixer, four mixing times were selected, as shown on Tableau A I.3. The first mixing time starts when the virgin binder is added. After the first mixing time, mixes were scraped with a heated spoon to raise the fine particles from the bottom of the bowl. The second mixing time was based on HMA without RAP and then doubled for each mix. HB total mixing time varies between 75 seconds to 285 seconds, PM from 45 seconds to 150 seconds, and TR mixing

time starts at 100 seconds and was increased to reach 380 seconds. For PM mixer, a 12° rotations per second was manually done every 15 seconds (180°) to ensure homogeneity.

Tableau A I.3 Mixing Type and Time

Mixer Type	First Mixing Time (s)	Second Mixing Time (s)	Abbreviation
Countertop HB	45	30	HB-1
		60	HB-2
		120	HB-3
		240	HB-4
Pug Mill PM	30	15	PM-1
		30	PM-2
		60	PM-3
		120	PM-4
Thermoregulated TR	60	40	TR-1
		80	TR-2
		160	TR-3
		320	TR-4

Figure A I.4 presents an organigram of the methodology. To prepare the raw materials, all the virgin aggregates were separated by sieve size, washed, and then dried. The RAP was dried at 40°C for a minimum of 72 hours or until constant weight. Bitumen was split in 1 L cans. The day before mixing, virgin aggregates were combined to achieve precisely the desired gradation, and put in the oven at the mixing temperature. Raw material conditioning depends on mixer type, as shown on Tableau A I.2. A single 20-kg batch was made for the thermoregulated and Pug Mill mixers. For the countertop mixer, due to its smaller size, 2 batches of 10 kg were made and then combined together. The 20 kg was then separated with a mechanical splitter to obtain two equivalent mixes. The separated mixes were then put in two asphalt boxes until testing.

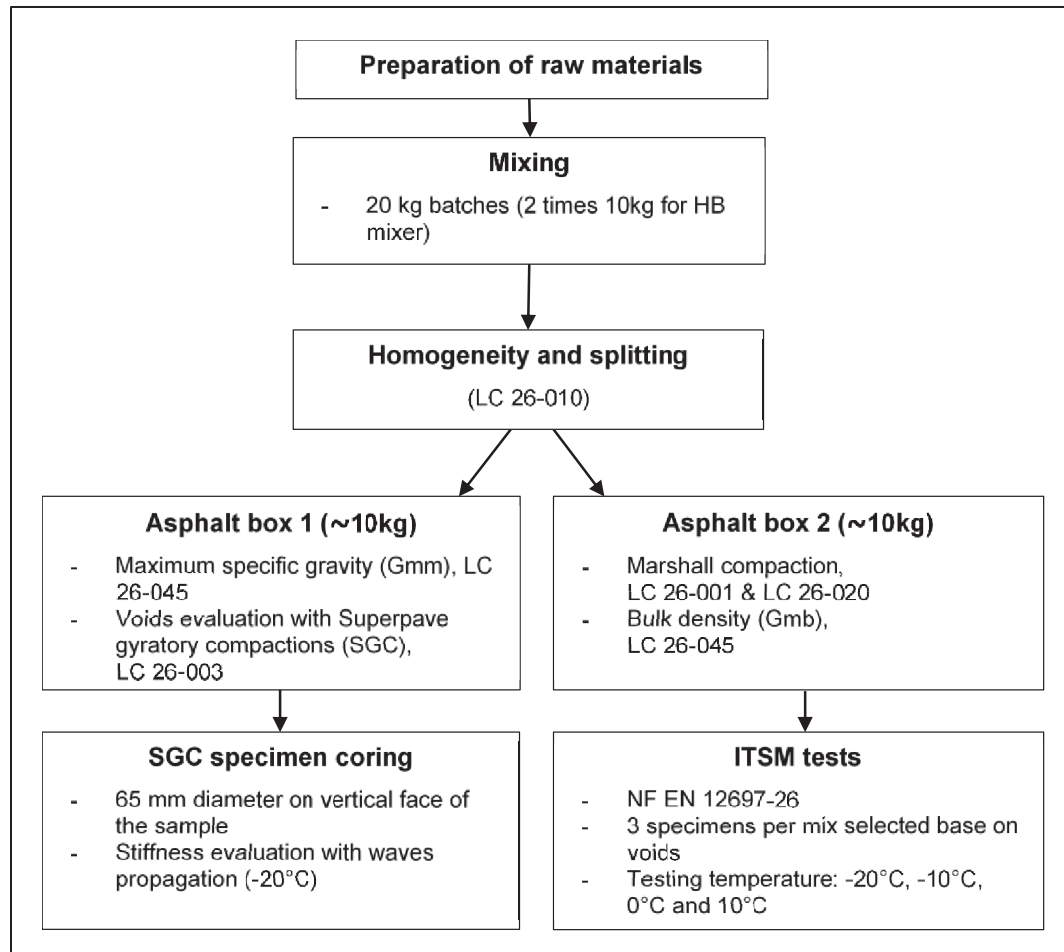


Figure A I.4 Organigram of the Study

Tests on the first boxes were done to evaluate the respective mix properties. The maximum specific gravity (G_{mm}) tests were done in accordance with Quebec test method LC 26-045. The voids were evaluated with the SGC based on Quebec test method LC 26-003. Densification curves were made to understand additionally the compact-ability. The compacted SGC samples (after 200 gyrations) were cored on their vertical face with a 65-mm diameter asphalt diamond coring bit.

The stiffness of the cored specimens was evaluated through wave propagation; a non-destructive method as explained previously. The compaction of the specimens from the second asphalt box were made with the Marshall compactor (40 blows each side, 6 specimens per mix)

based on Quebec test methods LC 26-001 and LC 26-020. The hydrostatic weighing was done to determine the voids and the bulk density of each specimen. Three Marshall specimens with similar voids for each mix were selected to do the Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) test base on NF EN 12697-26. This test was selected because it is a non-destructive test and the tested specimens are kept for future tests. A total of four testing temperatures were selected on each specimen (-20, -10, 0, and 10°C).

A I.5 Results and discussion

A I.5.1 Mix properties

In the Quebec mix design method, the volume of effective asphalt binder (V_{be}) at N_{des} is the criteria to help the designer during the conception of the HMA mixture. Tableau A I.4 presents the respective mix properties of each mix. The mix IDs are made from the name of the mixers (HB, PM or TR) and a number representing the different mixing times with 1 being the shortest time. For all mixes, RBR equals 27 percent and the total asphalt content is 5.6 percent.

Tableau A I.4 Mix properties

Mix ID	G_{mm} ($n=2$)	P_{ba} (%)	V_{be} (%)	VMA (%)	VFA (%)	G_{mb} ($n=1$)	V_i (%)
HB-1	2.526	0.44	12.3	18.0	68.2	2.381	5.7
HB-2	2.509	0.13	13.0	17.5	74.1	2.395	4.5
HB-3	2.518	0.29	12.6	17.1	73.9	2.406	4.5
HB-4	2.514	0.23	12.9	16.3	79.1	2.429	3.4
PM-1	2.530	0.54	11.7	20.8	56.1	2.299	9.1
PM-2	2.525	0.39	12.1	18.9	64.2	2.353	6.8
PM-3	2.521	0.32	12.3	19.0	64.3	2.349	6.8
PM-4	2.515	0.32	12.7	18.0	70.8	2.383	5.3
TR-1	2.524	0.41	12.0	19.9	60.3	2.325	7.9
TR-2	2.514	0.24	12.6	18.8	66.8	2.357	6.2
TR-3	2.519	0.33	12.4	19.1	64.7	2.349	6.7
TR-4	2.522	0.38	12.3	18.5	66.4	2.365	6.2
Note: G_{mm} is maximum theoretical specific gravity, P_{ba} is percentage of absorbed asphalt binder by mass, V_{be} is the effective volume of asphalt binder, VMA is Voids in the Mineral Aggregate, VFA is Voids Filled with Asphalt, G_{mb} is the bulk specific gravity of the mix, and V_i is volume of air voids in the mix.							

Figure A I.5 presents the evolution of G_{mm} obtained for each mixer type and mixing time. The first thing to note is that the G_{mm} and all volumetric properties do change according to the type of mixer and mixing time. On average, G_{mm} equals 2.520 with values ranging from 2.509 to 2.530. It is important to note that all the mixes have the exact same components and gradation. The closest values between the mixers are obtained between 100 and 120 seconds. For each mixer, the highest G_{mm} is obtained with the first mixing time. The G_{mm} depends on absorbed asphalt binder (P_{ba}), which increases with P_{ba} . In this G_{mm} test, the maximum repeatability accepted between two tests for a single operator is 0.011.

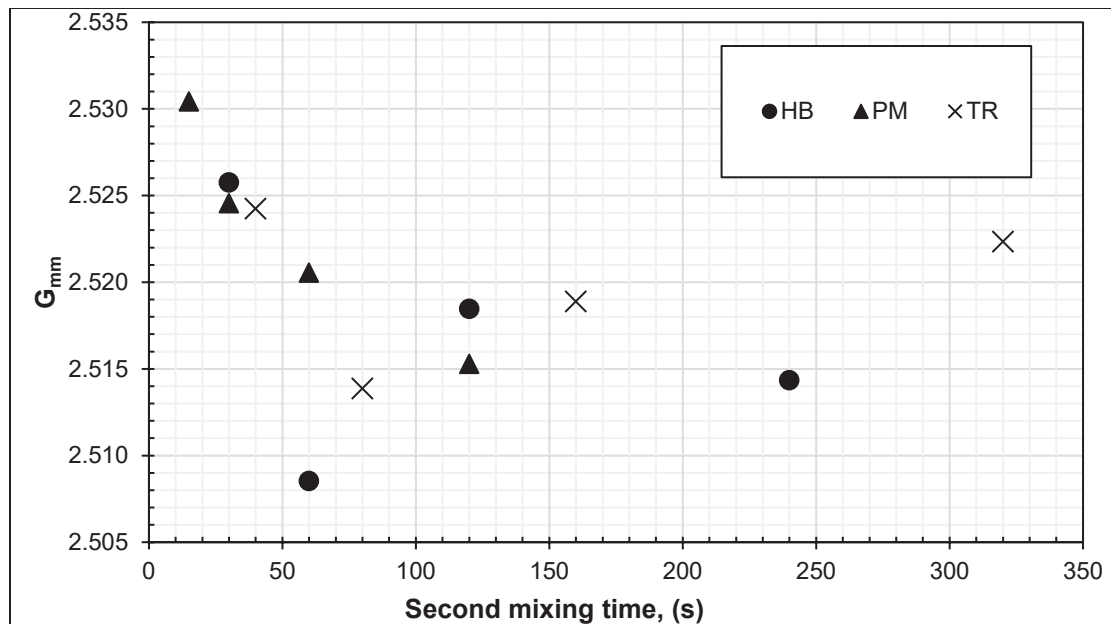


Figure A I.5 Theoretical Maximum Specific Gravity (G_{mm}) through Second Mixing Time

For the HB mixer, the drop in G_{mm} can be explained by the fact that during the first mixing, the RAP bitumen did not have enough time to mobilize in the mix. Considering that this mixer is not thermoregulated, the aggregates are overheated to a higher temperature than the mixing temperature. The virgin aggregates have a thermal energy superior to the RAP. This energy is used to homogenize the temperature of all the elements in the mixing bowl. The difference between these two mixes (HB-1 and HB-2) shows that the bitumen in RAP needs more time to mobilize. The mixing energy during the second mixing time and the increase in mobilized bitumen allows the aggregates to be more lubricated and closer together, thus reducing the voids. In addition, this additional lubrication generated by the mobilized recycled bitumen increases the workability of the mix and its compaction abilities. An increase in G_{mm} between the second and third mixing time is observed, that is mainly explained by P_{ba} and the intergranular voids, which decrease and the voids filled by the bitumen remains stable. The energy of the countertop mixer (HB) crushes aggregates and creates fine particles, which could affect the mix properties. Therefore, P_{ba} rose probably due to the increase of the Specific Surface Area (SSA) of the aggregates and counterbalance the effect of the workability of the mix. Then, G_{mm} decreases between the third and fourth mixing times. The main hypothesis for

this decrease in G_{mm} , which is also observed also for the PM mixer, is the fractionation of the aggregate during mixing. The mixing energy transmitted after the third mixing time causes a crumbling of the aggregates, which results in a release of the absorbed bitumen and an agglomeration of fine particles and bitumen on the aggregate surface.

For the PM mixer, G_{mm} is reduced with an increase of mixing time; the slope being more accentuated between the first and second mixing times, going from 2.530 to 2.525. Thereafter, the curve stabilizes, the density calculated for the third mixing time, at 60 seconds, is 2.521 and 2.515 for the fourth mixing time. In the same way as the countertop mixer, the materials must be overheated before being incorporated into the mixer. Therefore, the RAP benefits from this additional thermal energy to help mobilize the recycled bitumen. The high mixing energy of the mixer reduces mixing times by almost half compared to other mixers. On the first mixing time, little recycled bitumen is mobilized and a lot of bitumen is absorbed by the virgin aggregates. As the mixing time increases, the bitumen in the RAP is dispensed. In contrast to the hook-type stand mixer, the absorption of the aggregate is constantly lowering with the mixing time. This behaviour is similar to that observed between mixes three and four of the previous mixer. This leads one to believe that the fractionation is done in the first 30 seconds of mixing and then the agglomeration of fine particles and bitumen sticks to the aggregates to prevent the absorption from taking place.

For the TR mixer, a reduction in G_{mm} is observed between the first and second mixing times, from 2.524 to 2.514. Thereafter, the evolution of the density between the second and third mixing times, as well as the third and fourth, is positive and more or less constant. The evolution is more increased for the second and third mixing times by increasing by 0.005, and stabilizes between third and fourth; increasing by 0.003. A plausible explanation for this increase in density is related with the P_{ba} , the volume of Voids Filled with Asphalt (VFA), the effective bitumen volume (V_{be}), and the intergranular void volume referred to as Voids in the Mineral Aggregate (VMA). The time allows the RAP, already hot (145°C), to warm up more and the bitumen in the RAP mobilizes rapidly. Thus, there is more recycled bitumen and part of the VMA are quickly filled, but the aggregates have not yet had time to absorb it. Indeed,

as it can be seen with the drop of the maximum specific gravity, the P_{ba} and VMA drop while V_{be} and VFA increase. At the beginning, all the RAP is saturated with its bitumen, so the P_{ba} is very high since 30 percent of the mix is made of RAP and the bitumen absorbed by it does not necessarily have time to redistribute, since the mixing energy is not strong enough.

For the ESG-10 mix, a value of 12.2 percent for V_{be} is recommended. Overall, the first mixing time gives the lowest V_{be} for all mixers type. It could mean that this mixing process activate even more the RAP bitumen with the mixing time. The PM has the lowest value, followed by TR, and the HB. For the PM, V_{be} increases linearly with the mixing time from 11.7 to 12.7 percent. For the others mixers, the results are not expected and no trend is observed. The HB mixer has the highest V_{be} , going from 12.3 to 13.0 percent and the highest value is obtained after the second mixing time, as with the TR mixer. The V_{be} for the TR mixer varies between 12.0 and 12.6 percent.

A I.5.2 SGC results

Tableau A I.5 shows the voids obtain at 10, 80, and 200 gyrations, for all mixer types.

Tableau A I.5 Superpave Gyrotory Compactor (SGC) Results

Mix ID	Voids, (%) (at N gyrations)		
	10	80	200
HB-1	14.4	5.7	2.9
HB-2	13.5	4.5	1.7
HB-3	13.5	4.5	1.8
HB-4	12.4	3.4	1.2
TR-1	16.5	7.9	5.0
TR-2	15.1	6.2	3.4
TR-3	15.5	6.7	3.8
TR-4	15.1	6.2	3.4
PM-1	17.6	9.1	6.3
PM-2	15.6	6.8	3.9
PM-3	15.5	6.8	3.9
PM-4	14.1	5.3	2.5

Quebec's standard demands over 11.0 percent at N_{ini} (10 gyrations), which represents the voids at the beginning of the compaction process in the field. All the mixes respect this condition. N_{des} (80 gyrations) is comparable to the end of the compaction and the beginning of road traffic. For ESG-10 mixes, voids must be between 4 and 7 percent. Results for HB-4, TR-1, and PM-1 do not respect the N_{des} requirement. At N_{max} (200 gyrations), mix voids must be over 2.0 percent to resist the creep rutting at the end of their life. Results for HB-2, HB-3, and HB-4 mixes do not respect this criterion.

Figure A I.6 presents the air voids obtained on SGC compaction at N_{des} (80 gyrations). To respect the Quebec standard, voids must remain between the 4 and 7 percent at N_{des} for ESG-10 mixes. Five mixes out of the twelve tested do not meet this requirement. It is important to note, again, that all 12 mixes shown in Tableau A I.4 are identical in terms of components;

only the mixing methodology differs. So, the first observation is that the type of lab mixer and the mixing time do have an effect on the compaction. This means that the same formula could have conforming or non-conforming voids depending on the method used. This can be critical for some mixtures. Overall, air voids tend to diminish with mixing time, for each type of mixers.

The first mixing time is the mixing time used for mixes without RAP as recommended by the MTQ in LC 26-003. By increasing this mixing time, voids started to drop. As mentioned earlier, increasing the mixing time could further activate the bitumen in the RAP, thereby increasing the compact-ability of the mixtures. On the first mixing time, the PM and TR mixer do not respect the MTQ criteria, but achieved the specified air voids after the second mixing time. HB mixes have the lowest voids for all the mixing times, even that the last mixing time does not respect the criteria (too low).

The TR mixer has shown a voids stabilisation between the second and the fourth mixing times. The biggest voids change with mixing time is observed with the PM. Between the first and the fourth mixing times, a difference of 3.9 percent in the air voids is observed. The first mixing time results in high air voids (9.1 percent) and the fourth one is around the middle of the voids requirement (5.3 percent). The PM is the most aggressive mixer, so increasing mixing time could affect the aggregate sizes.

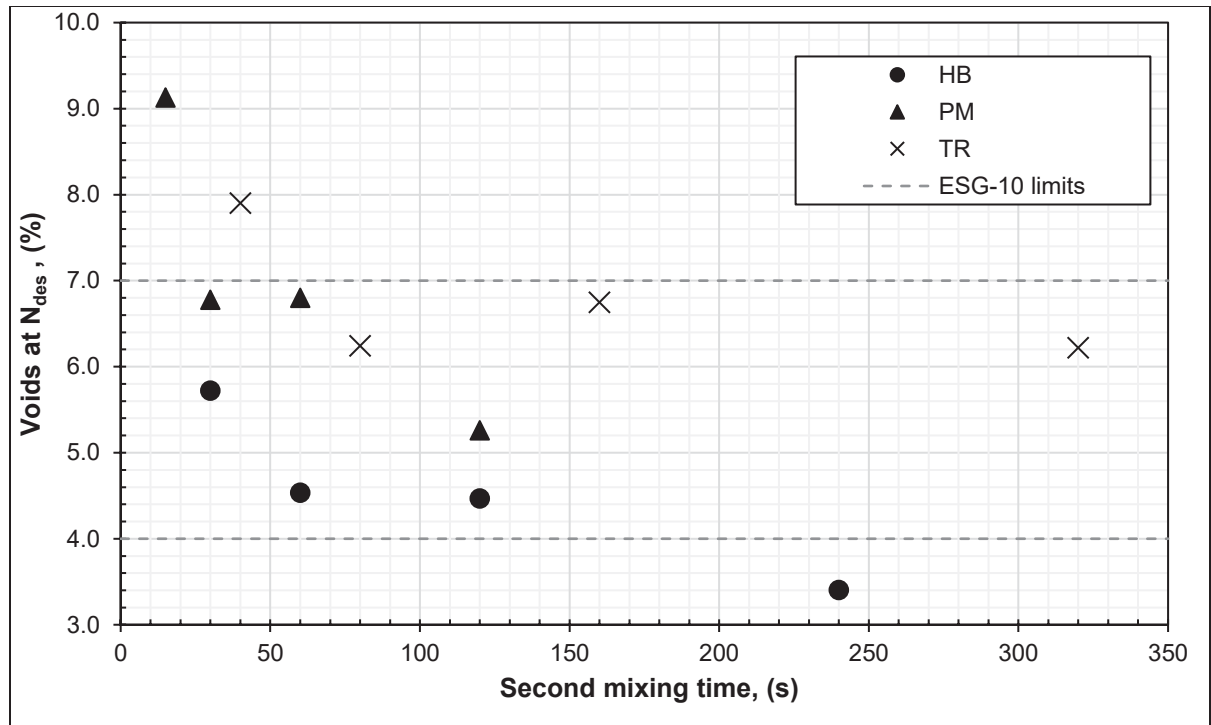


Figure A I.6 Superpave Gyratory Compaction (SGC)
Air Void Results at N_{design} (80 gyrations)

A I.5.2.1 Voids Analysis

To continue the analysis, densification curves were analyzed for each mixer type, respectively. Figure A I.7 displays the densification curve for the PM mixes.

The number of gyrations to achieve 92 percent G_{mm} is the highest on the first mixing time (114) and drop to 59 and 58 for mixes PM-2 and PM-3, respectively. The lowest value is obtained on mix PM-4 with a value of 40. It means that increasing mixing time enhances the workability of mixes and the compaction will be achieved easily on the field.

By assuming that the aggregates are more crushed during a longer mixing process, the specific surface area of the aggregates should increase and result in lower asphalt film thickness. A lower asphalt film thickness will negatively affect the workability of the mix. Again, the RAP binder activation increases with the mixing time. A higher asphalt content raises the

workability of the mix. Mixes PM-2 and PM-3 have the same behaviour, which could be an indicator of an optimal time. The compaction slope of PM-2, PM-3, and PM-4 are nearly parallel, which means that the density-increasing speeds are nearly the same. Mix PM-1 is a bit lower than the others mixes so the density-increasing speed is a bit lower as well.

The percentage of the maximum theoretical specific gravity at the initial number of gyrations ($G_{mm}\%$ at N_{ini}) on the first mix is the lowest (82.4 percent G_{mm}) followed by PM-2 (84.4 percent G_{mm}) and PM-3 (84.5 percent G_{mm}). The highest value is obtained with mix PM-4 (85.9 percent G_{mm}). Again, higher asphalt content in a mix improves initial workability, which could be an indication that the mobilization of RAP binder is increased through the mixing process. Again, PM-2 and PM-3 showed the same behaviour, which could be an indicator of the optimal mixing time for this mixer type.

The Compaction Energy Index (CEI) follows the same trend as the number of gyrations to achieve 92 percent G_{mm} . PM-1 has the highest value (84) and could be hard to achieve compaction in the field. The CEI drops to 45 and 44 for PM-2 and PM-3 mixes, respectively, and the lowest value is obtained on PM-4 mix (33).

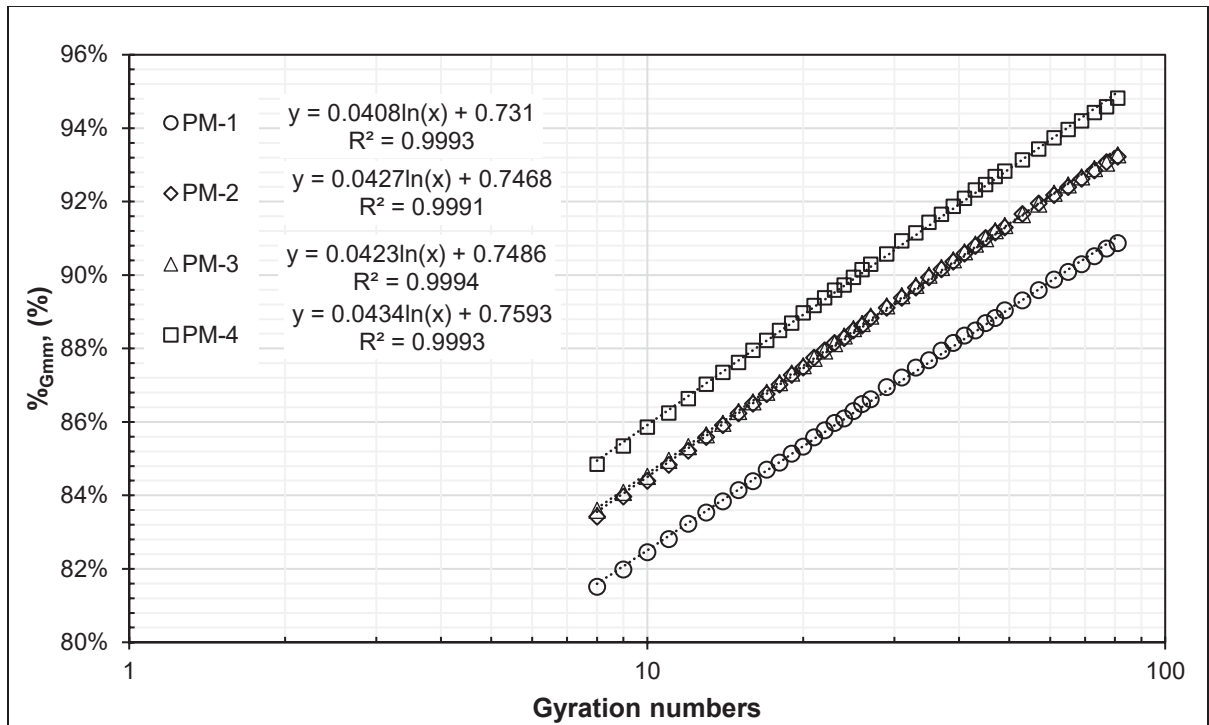


Figure A I.7 Densification Curves of Pugmill Mixer (PM) Mixes

The number of gyrations to achieve 92 percent G_{mm} is the highest on the first mixing time HB-1 (45) and drops to 35 and 34 for mixes HB-2 and HB-3, respectively. The lowest value is obtained on mix HB-4 with a value of 26. As previously observed, increasing mixing time enhances the workability of mixes and compaction will be achieved more easily in the field. The aggregates should be more crushed during a longer mixing process and the specific surface area of the aggregates should increase, with a lowering of asphalt film thickness. A lower asphalt film thickness should negatively affect the workability of the mix. Once again, increasing the mixing time seems to activate the bitumen from the RAP. A higher asphalt content raises the workability of the mix. Mixes HB-2 and HB-3 have the same behaviour, which could be an indicator of an optimal mixing time.

The compaction slope of HB-2, HB-3 and HB-4 have the same value (10.0), which means that the density-increasing speeds are the same. HB-1 is a bit lower than the others mixes (9.7), the density-increasing speed is a bit lower.

The $G_{mm}\%$ at N_{ini} on HB-1 is the lowest (85.6 percent G_{mm}) following by HB-2 and HB-3 (86.5 percent G_{mm}). The highest value is obtained with mix HB-4 (87.6 percent G_{mm}). A difference of 2.0 percent is observed; the initial workability is better with a longer mixing time. Higher asphalt content in the mix improved initial workability, which could be an indication that the mobilization of RAP binder is increased through the mixing process. Mixes HB-2 and HB-3 showed the same behaviour and could be an indicator of the optimal mixing time for this mixer type.

The CEI follows the same trend as the numbers of gyration to achieved 92% G_{mm} . HB-1 has the highest value (33) and could be hard to achieve the compaction on the field. The CEI drops to 24 and 23 for HB-2 and HB-3 mixes respectively and the lowest value is obtained on HB-4 mix (21). Those low values explain that the behavior of those mixes could be trickier to compact on field. HB-4 does not respect the MTQ criteria at N_{des} and N_{max} . HB-2 and HB-3 does not respect the MTQ criteria at N_{max} .

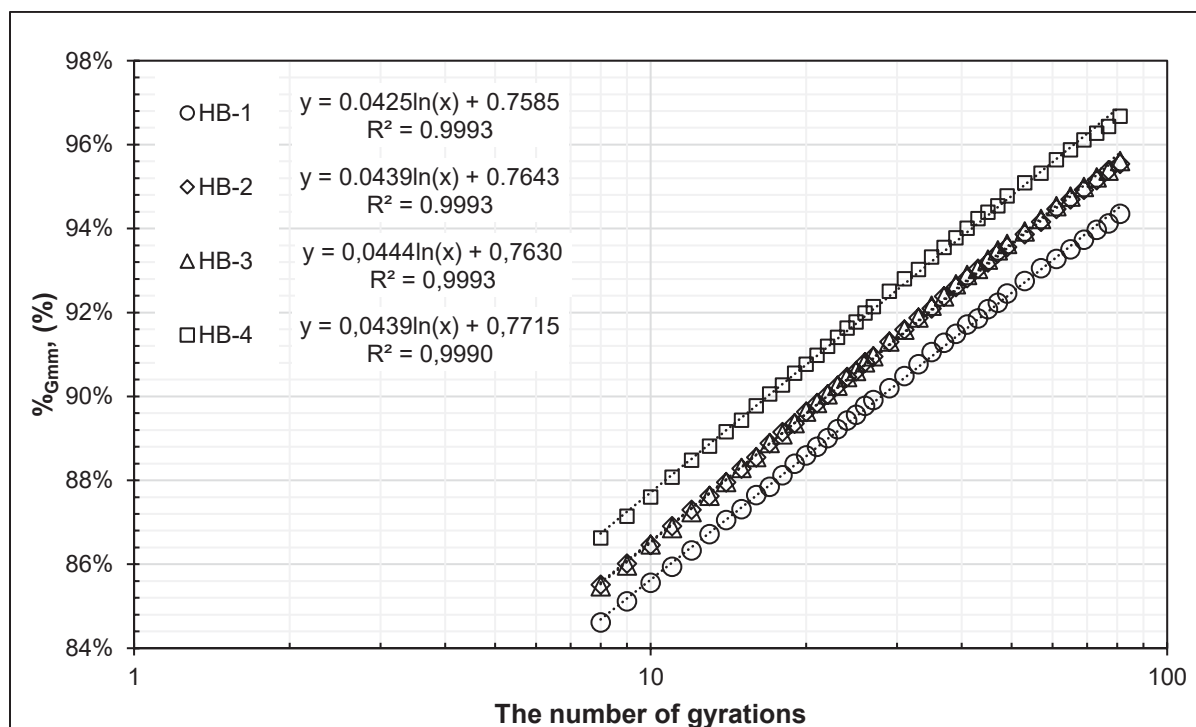


Figure A I.8 Densification Curves of Counter Top (HB) Mixes

The number of gyrations to achieve 92 percent G_{mm} is the highest on the first mixing time TR-1 (75) and then it drops to 51 for TR-2, raises to 57 for TR-3, and drops again 50 for TR-4. Again, increasing mixing time seems to enhance the workability of mixes, but a stabilisation is observed from TR-2 to TR-4. The TR mixer does not seem to affect the aggregates size, so less change in specific surface area was observed than the PM and HB mixers. As mentioned earlier, a higher asphalt content raises the workability of the mix. Because of the higher RAP temperature before mixing, the optimal time to activate all the RAP binder is reached more quickly. It appears that RAP binder could be activated during the heating before the mixing. The first mixing time seems to be too short due to the high value of 92 percent G_{mm} , it may require more compaction when laying the asphalt.

The compaction slope of TR-2, TR-3, and TR-4 have nearly the same value, which means that the density-increasing speeds are nearly the same. TR-1 is a bit lower than the others mixes (9.5); the density-increasing speed is a bit lower.

The $G_{mm}\%$ at N_{ini} of TR-1 mix is the lowest (83.5 percent G_{mm}) following by TR-3 (84.5 percent G_{mm}). Mixes TR-2 and TR-4 have the same value and they are the highest (84.9 percent G_{mm}). Higher asphalt content in mix improved initial workability of mixture, which could be an indication that the mobilization of RAP binder is not complete after the first mixing time.

The CEI follows the same trend as the numbers of gyration to achieved 92 percent G_{mm} . Mix TR-1 has the highest value (61) and could be hard to achieve compaction on the field, as found on Figure A I.9. The CEI drops to 38 and 43 for TR-2 and TR-3 mixes, respectively and the lowest value is obtained on the TR-4 mix (37). TR-1 does not respect the MTQ criteria at N_{des} . Table 6 presents the SGC analysis values. For each mixer type, the first mixing time, which is the time used for mixes with no RAP, does not have the same behaviour as the three others mixes.

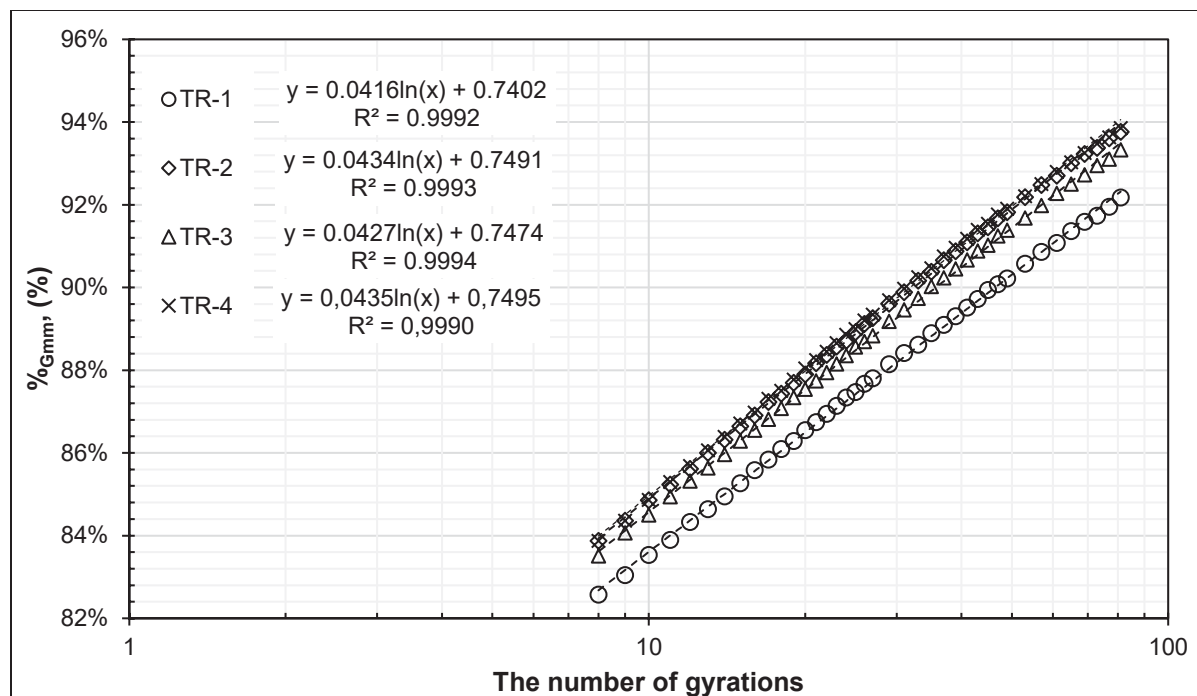


Figure A I.9 Densification Curves of Thermoregulated (TR) Mixes

Tableau A I.6 Superpave Gyrotory Compactor (SGC) Analysis Values

Mix ID	Number of Gyrations to 92% G _{mm}	%G _{mm} at N _{ini} (10)	%G _{mm} at N _{des} (80)	Compaction Slope	Compaction Energy Index (CEI)	Conforms to 4202 Standard? (Quebec)
PM-1	103	82.4	90.9	9.3	84	n
PM-2	58	84.4	93.2	9.8	45	y
PM-3	57	84.5	93.2	9.6	44	y
PM-4	45	85.9	94.7	9.8	33	y
TR-1	75	83.5	92.1	9.5	61	n
TR-2	51	84.9	93.7	9.9	38	y
TR-3	57	84.5	93.3	9.7	43	y
TR-4	50	84.9	93.8	9.9	37	y
HB-1	45	85.6	94.3	9.7	33	y
HB-2	35	86.5	95.5	10.0	24	n
HB-3	34	86.5	95.5	10.0	23	n
HB-4	31	87.6	96.6	10.0	21	n

Note: G_{mm} is the theoretical maximum specific gravity of the asphaltic concrete mixture.

A I.5.3 Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM)

A I.5.3.1 Voids of ITSM Specimens

Marshall voids were determined by hydrostatic weighing. Figure A I.10 shows the average of three specimens that have similar voids. Overall, it can be noticed that the voids are significantly different between mixer types and time, and that the voids are lower than the voids obtained at N_{des} with the SGC.

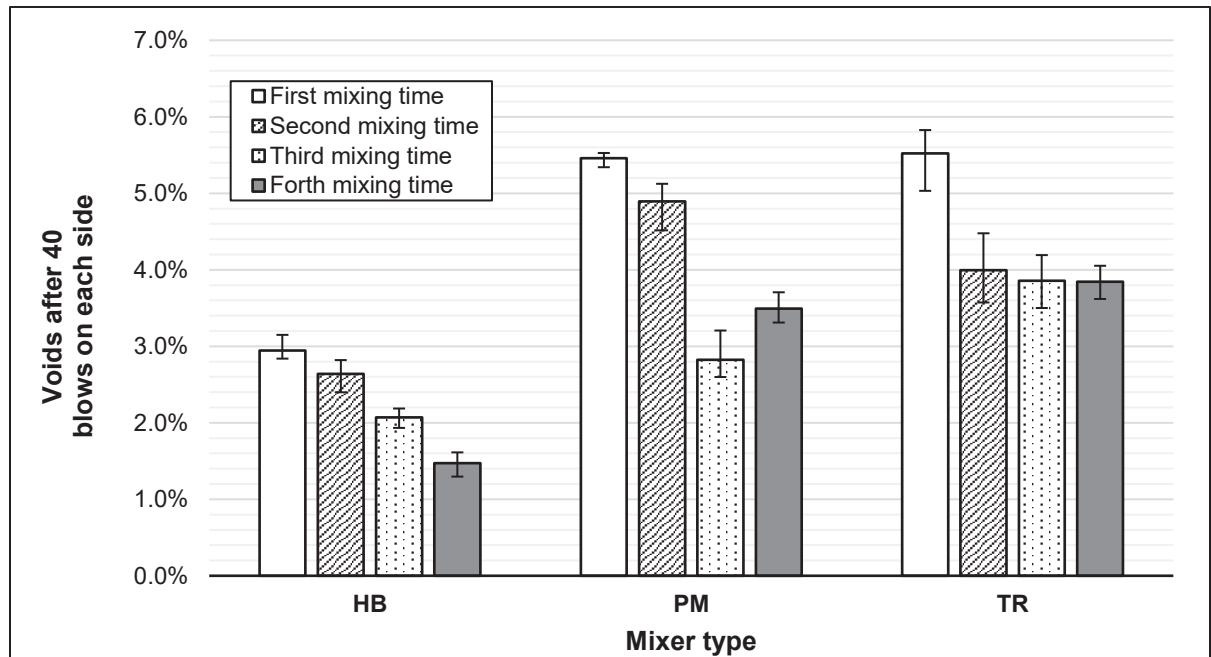


Figure A I.10 Samples Voids for Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) Tests (n=3)

For the HB mixes, if we compare the Marshall voids with the SGC voids, the air voids obtained with Marshall compaction for the first mixing time corresponds to 153 gyrations, 145 gyrations for the second mixing time, 171 gyrations for the third mixing time, and 178 gyrations for the fourth mixing time. For the TR mixes, the first mixing time corresponds to 147 gyrations, 159 gyrations for the second mixing time, 196 gyrations for the third mixing time, and 151 gyrations for the fourth mixing time. For the PM mixes, Marshall voids were not achieved on SGC for mixes PM-1 and PM-3 where a gap of 0.6 and 1.1 percent is observed, respectively.

Marshall voids were obtained at 171 gyrations for PM-2 and 143 gyrations for PM-4. From those values, no correlations could be found between those two compactions methods. The comparison of both compaction methods is out of scope of this paper, but it is clear that the mixing time and the mixer type influence the mix properties enough to show differences in the compactability.

A I.5.3.1 ITSM results

Figure A I.11 and Tableau A I.7 present the PM mix ITSM results. Quebec has no specifications related to this test. On average, PM-2 stiffness increased by 5.5 percent, PM-3 stiffness increased by 5.2 percent, and PM-4 stiffness increased by 12.1 percent. Overall, PM-2 and PM-3 showed similar behaviour, even with an average of 2.1 percent of voids variance. The stiffness increase of PM-4 could be explained by fewer voids (2.0 percent lower than PM-1). Again, mixing time could affect the particle size distribution of the HMA and could increase the binder oxidation, which results in increasing the stiffness.

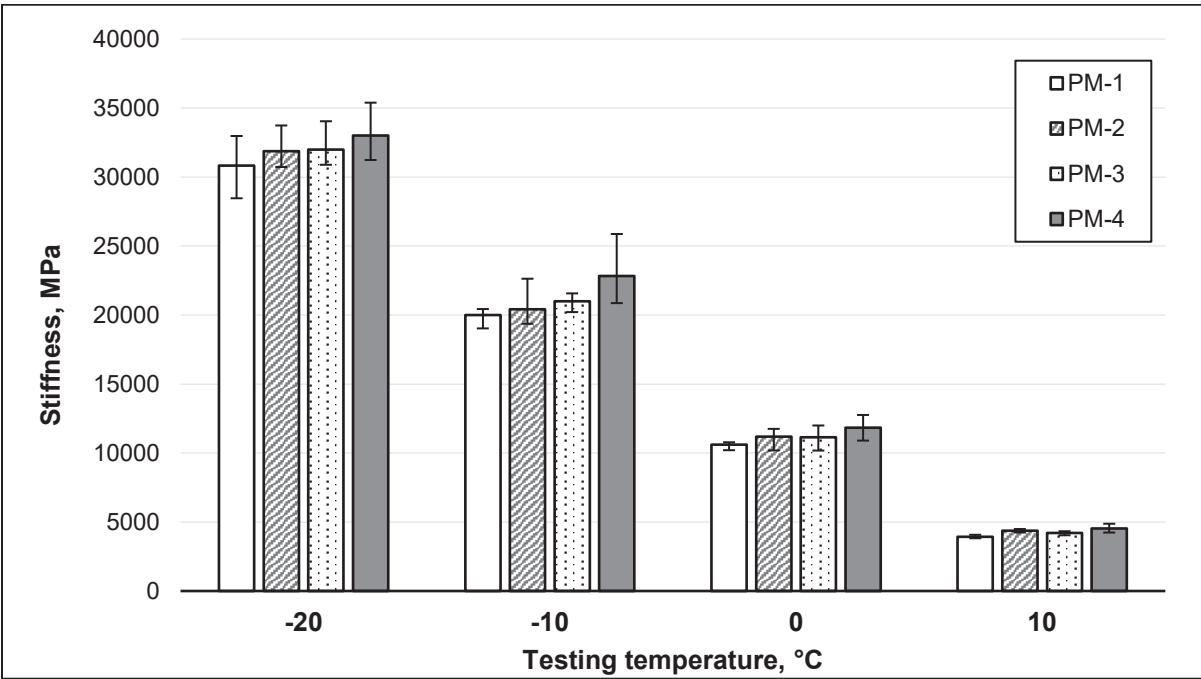


Figure A I.11 Pug Mill (PM) Mixer Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) Results (n=3)

Tableau A I.7 Pug Mill (PM) Mixer Stiffness Change (n=3)

Temperature °C	PM-1	PM-2 ¹		PM-3 ¹		PM-4 ¹	
	Stiffness MPa	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %
-20	30,821	+ 1,062	3.4%	+ 1,179	3.8%	+ 2,179	7.1%
-10	20,009	+ 412	2.1%	+ 995	5.0%	+ 2,821	14.1%
0	10,598	+ 581	5.5%	+ 541	5.1%	+ 1,248	11.8%
10	3,935	+ 439	11.2%	+ 279	3.9%	+ 604	22.8%
¹ Results compared with the first mixing time (PM-1)							

Figure A I.12 presents the HB results and Tableau A I.8 presents the stiffness change through the mixing time. On average, HB-2 stiffness increased by 6.0%, HB-3 stiffness increased by 7.4% and HB-4 stiffness increased by 13.2%. Stiffness increased through mixing time. Overall, HB-2 and HB-3 showed similar behaviours with similar voids for temperatures -10°C to 10°C. Once again, lower voids combined with the bitumen oxidation could partially explain the stiffness increase of HB-4 (1.4% lower than HB-1). As previously mentioned, increasing the mixing time of the countertop mixer could affect the particles sizes distribution of the HMA, which results in an increase of the stiffness.

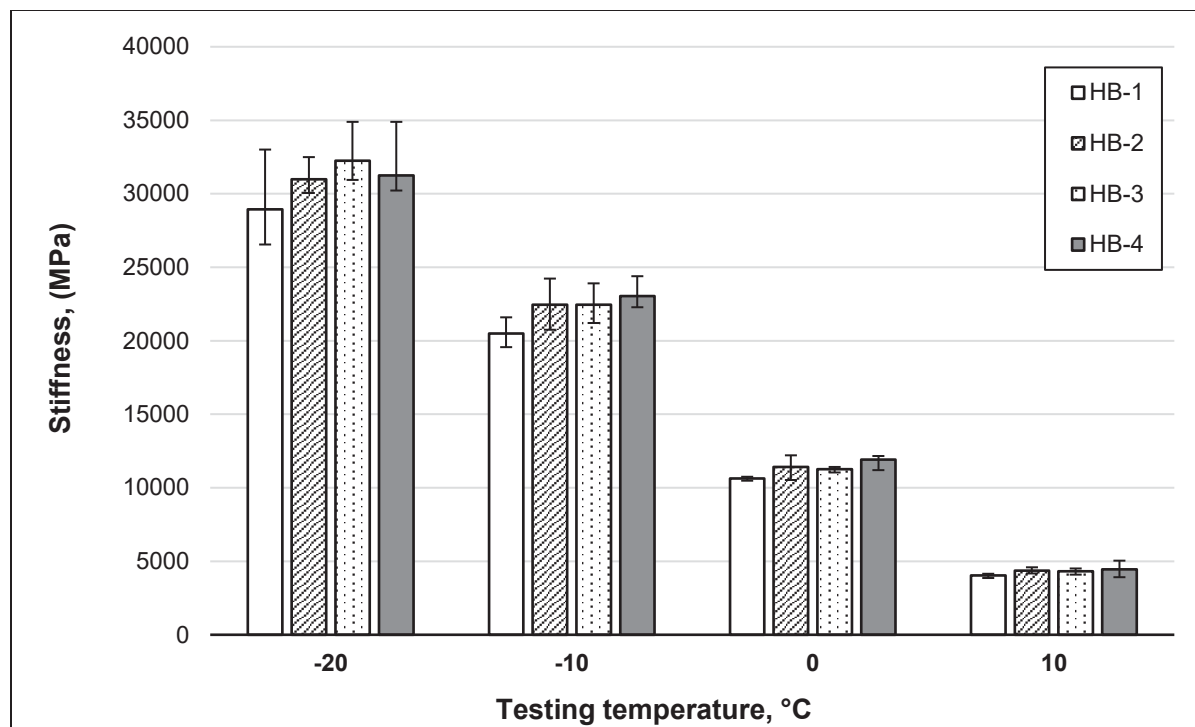


Figure A I.12 Countertop (HB) Mixer Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) Results (n=3)

Tableau A I.8 Countertop (HB) Mixer Stiffness Change (n=3)

Temperature °C	HB-1	HB-2 ¹		HB-3 ¹		HB-4 ¹	
	Stiffness MPa	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %
-20	29 765	+ 1 456	4.9%	+ 3 062	10.3%	+ 1 631	5.5%
-10	20 489	+ 1 955	9.5%	+ 1 967	9.6%	+ 2 557	12.5%
0	10 630	+ 789	7.4%	+ 630	5.9%	+ 1 285	12.1%
10	4 030	+ 92	2.3%	+ 156	3.9%	+ 920	22.8%

¹ Results compared with the first mixing time (HB-1)

Figure A I.13 presents the TR mix ITMS results and Tableau A I.9 shows the stiffness change through the mixing time. On average, TR-2 stiffness increased by 3.3 percent, TR-3 stiffness increased by 3.9 percent, and TR-4 stiffness increased by 15.0 percent. TR-2 and TR-3 showed similar stiffness, even if the voids were higher for TR-2. Overall, stiffness rose through mixing time. Mixing time seems to affect ITSM results further at lower temperature. The stiffness increase of TR-4 could be explained by the oxidation of the binder, while it was mixed 160 more seconds than TR-3 in a temperature-controlled mixer at mixing temperature.

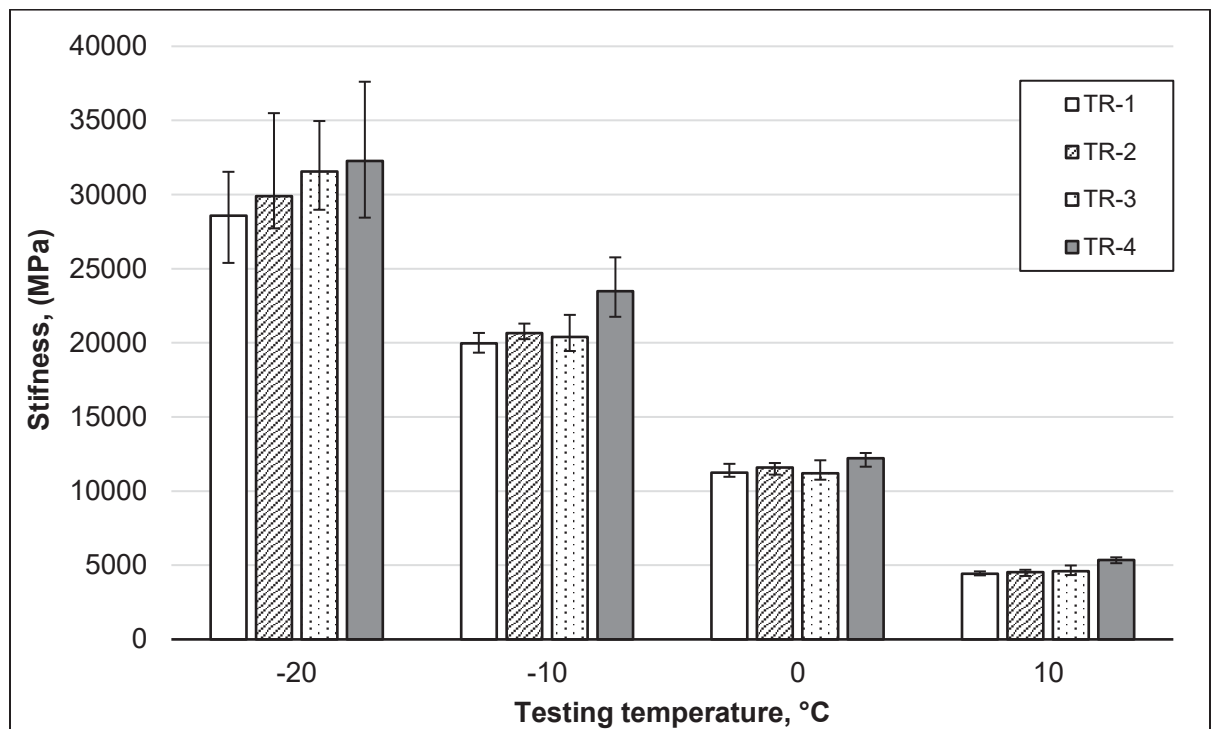


Figure A I.13 Thermoregulated (TR) Mixer Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) Results (n=3)

Tableau A I.9 Thermoregulated (TR) Mixer Stiffness Change (n=3)

Temperature °C	TR-1	TR-2 ¹		TR-3 ¹		TR-4 ¹	
	Stiffness MPa	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %
-20	28,576	+ 1,311	4.6%	+ 2,986	10.5%	+ 3,688	12.9%
-10	19,959	+ 696	3.5%	+ 435	2.2%	+ 3,533	17.7%
0	11,255	+ 331	2.9%	- 435	2.2%	+ 956	8.5%
10	4,436	+ 92	2.1%	+ 156	3.5%	+ 920	20.7%
¹ Results compared with the first mixing time (TR-1)							

A I.5.4 Wave propagation results

For the wave propagation test, an average of 5 tests (5 impacts per test, 25 impacts total) was done on all mixes. All the stiffness recorded were higher by about 10,000 MPa as compared to the stiffness obtained on ITSM tests at -20°C. Specimens were drilled from the centre of the SGC sample. On average, air voids were 2.5 percent lower for the ITSM specimens since they were taken after 200 gyrations as presented in Tableau A I.9. All the measured voids on the specimens were lower by 2.0 percent compared to the SGC results at 200 gyrations, which means that the air voids are lower in the centre of the SGC.

Tableau A I.10 Indirect Tensile Stiffness Modulus Core Specimens
Extracted from Superpave Gyratory Samples

Mix ID	Average Height mm (n=3)	Average Diameter mm (n=3)	Air Voids %
HB-1	129.17	57.47	1.1%
HB-2	127.23	57.43	0.2%
HB-3	131.53	57.47	0.7%
HB-4	128.12	57.40	0.1%
TR-1	127.78	57.34	1.6%
TR-2	107.59	57.31	0.6%
TR-3	141.60	57.35	1.2%
TR-4	134.69	57.44	1.5%
PM-1	128.80	57.42	2.6%
PM-2	132.72	57.40	1.7%
PM-3	131.79	57.27	0.8%
PM-4	136.21	57.39	1.8%

The wave propagation tests indicate that the HB mixes had the highest stiffness while the lowest stiffness was obtained on the TR mixes. Tableau A I.11 presents the wave propagation test results.

Tableau A I.11 Wave Propagation Test Results (n=5)

Mixing Type	1	2		3		4	
	Stiffness MPa	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %	Stiffness Change MPa	Stiffness Change %
PM mixes	41,584	+ 627 ¹	1.5%	+ 1,568 ¹	3.8%	+ 860 ¹	2.1%
HB mixes	42,999	+ 585 ²	1.4%	+ 267 ²	0.6%	+ 610 ²	1.1%
TR mixes	41,676	- 1,778 ³	4.3%	+ 455 ³	1.1%	- 246 ³	0.6%
¹ Results compared with the first mixing time (PM-1) ² Results compared with the first mixing time (HB-1) ³ Results compared with the first mixing time (TR-1)							

For the HB mixer, the stiffness difference between mixes is very low. Air void reduction seems to be related to the increase of the stiffness. The TR-2 mix result was not expected, it could be a manipulation error. Therefore, the stiffness change of TR-3 and TR-4 seems to follow the air voids. PM mixes stiffness raise with the air voids. For all mixes, results do not follow the trend of ITSM results at -20°C. Since the specimens does not have the same air voids, it is not possible to evaluate the impact of mixing process on stiffness with the wave propagation test.

A I.6 Conclusion

The presented research work focused on the impact of mixing time and mixer type on a 30 percent RAP content HMA. Three mixers have been studied: a countertop mixer, a thermoregulated mixer, and a laboratory Pug Mill mixer. For each mixer, four batches have been formulated with different mixing time and have been evaluated with respect to workability and stiffness.

Overall, air voids decreased with an increase in mixing time, which is probably due to the modification of the aggregate size that is broken during the mixing process. Voids increased between the third and fourth mixing time for the Pug Mill mixer for Marshall compacted specimens. It could also be caused by the bitumen oxidation, resulting from longer mixing

time, that could be sufficient to modify the mix workability. A relation was not observed between Marshall (40 blows each side) and SGC compaction, where an average of 2 percent difference in voids for each mixer type and mixing time was observed. With the tests presented herein, it is not possible to characterize the level of bitumen oxidation with the compaction tests. Specimens should have the same voids to have a better idea of the impact of mixing process on bitumen oxidation. Fourier-Transform Infrared (FTIR) spectroscopy could help to better understand the bitumen oxidation contribution.

ITSM and wave propagation were used to evaluate the impact of mixing methodology on mix stiffness. ITSM results have shown an overall increase with mixing time, even if the voids are higher. The blending of bitumen between RAP and virgin binders seems to be incomplete after the first mixing time. By increasing the mixing time, the blending between the RAP and virgin binder seems to be more complete. An equilibrium with respect to stiffness is observed on the second and third mixing time. Bitumen oxidation during the last mixing time seems to have a major impact on stiffness, where an increase of more than 10 percent is observed for each type of mixer. From the results, no correlations could be observed between wave propagation and ITSM results at -20 °C, since it was not the same specimen. The stiffness recorded with wave propagation tests is overall of 35 percent higher compared to ITSM. This is partly expected because of the higher frequency recorded (over 14,000 Hz).

ANNEXE II

RHEOLOGICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF MULTIPLE RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT SOURCES FROM QUEBEC, CANADA

Marc-André Bérubé^a, Kevin Bilodeau^b, Gabriel Orozco^c, Sébastien Lamothe^d, and Alan Carter^e

^{a,c,d,e} Department of Construction Engineering, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

^b Bauval Inc.
210 Bd De Montarville, Boucherville, Québec J4B 6T3

Article présenté à la conférence « *International Society for Asphalt Pavement (ISAP)* », octobre 2022

A II.1 Abstract

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is now commonly added in new asphalt mixes to decrease the environmental impact by increasing the economic benefit. Depending on the low temperature performance grade of the RAP binder, a guideline in Canada proposes change in mix depending on the amount of RAP used. Studies show that adding RAP in new mix could increase the overall mix performance, but some studies show negative impacts. A lack of knowledge of the reason for the behavior of the asphalt pavement is due to the wrong RAP property characterization.

The performance of the asphalt mixes is influenced by many parameters, such as RAP content and RAP source. In the optic of including more recycle materials, a better understand of the RAP properties is needed. This study aims to develop a characterization method to have a better understanding of the behavior of the RAP material by comparing eight sources from the same climate region. To accomplish this, the properties of the RAP material, aggregates and binder properties were evaluated. For RAP material, maximal specific gravity, asphalt content and particles size distribution had been made. For RAP aggregates, particles size distribution

and specific bulk density were tested. For RAP binders, Brookfield viscometer, Bending Beam Rheometer, Dynamic Shear Rheometer and penetrometer were used to evaluate the rheological properties and the 2S2P1D model was used to model the linear viscoelastic (LVE) behaviour. All RAP showed different results on many characteristics.

A II.2 Introduction

The use of recycled materials, such as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), is increasingly used in asphalt mixes. However, it is not common to use large quantities of RAP (over 30 %) in asphalt mixes in Canada because of a lack of knowledge on the subject, and because of a fear regarding performance and workability behaviour of asphalt containing RAP. Canada's road network is the seventh largest in the world with just over 1,000,000 km (PIARC, 2015). Approximately 95 % of paved roads are asphalt pavements. According to the Canadian Infrastructure Report, over 25 % of municipal roads are in a condition considered fair, poor or very poor (BRIC, 2016). On-road experience and laboratory research have demonstrated the benefits of using RAP. The use of RAP provides substantial cost savings, and lessens the environmental footprint of pavements by preventing the discharge of asphalt material in landfills (or in stockpiles).

However, the current laboratory quality-control methods limit the quantity of RAP in new mixes due to this lack of knowledge (Chesner, Collins, MacKay & Emery, 2002). RAP is currently characterized on physical properties such as asphalt content, maximum specific gravity and particle size distribution. Other characteristics, such as RAP binder rheological properties, have an impact on the behavior of the asphalt material (Basueny, Perraton & Carter, 2014, Salim, Gundla, Underwood & Kaloush, 2019). In particular, the linear viscoelastic (LVE) behaviour of RAP binder could be paramount. The 2S2P1D model has been proven useful and precise for LVE behaviour of bituminous materials (Olard & Di Benedetto, 2003, Mangiafico, Sauzéat & Di Benedetto, 2019a) including RAP binders (Mangiafico, Sauzéat & Di Benedetto, 2019b).

This paper focus on the properties of the RAP material, aggregates and binder properties. Tests on RAP material are the maximal specific gravity, the asphalt content and the particles size distribution. For RAP aggregates, the tests are the particles sizes distribution and the specific bulk density. For RAP binders, Brookfield viscometer, Bending Beam Rheometer, Dynamic Shear Rheometer and penetrometer are used to evaluate the rheological properties and the 2S2P1D model is used to model the linear viscoelastic (LVE) behaviour.

A II.3 Experimental plan

Figure A II.1 presents the schematic diagram of the research methodology. A total of eight (8) sources of RAP all coming from the Montreal region, in the southwest of Quebec, in Canada, were selected. For this study, six (6) sources of RAP with a maximum size of 10 mm (0/10) and two (2) sources with a maximum size of 20 mm (0/20) have been selected.

The 1st phase of this study has been done on RAP materials. The maximum specific gravity (G_{mm}) and the asphalt content (P_b) have been conducted according to the Quebec test method LC 26-045 and LC 26-006, respectively.

For 1st and 2nd phases, the Quebec test method LC 26-007 used for determined the particles size distribution for RAP materials (black curve) and for RAP aggregates (white curve) from the ignition oven. The effective specific gravity (G_{se}) and the absorbed asphalt (P_{ba}) are calculated with the specific bulk gravity (G_{sb}) of RAP aggregates (LC 21-065 and LC 21-067 test methods), and the asphalt content (P_b) and the maximum specific gravity (G_{mm}) determined on RAP material (LC 26-006 and LC 26-045).

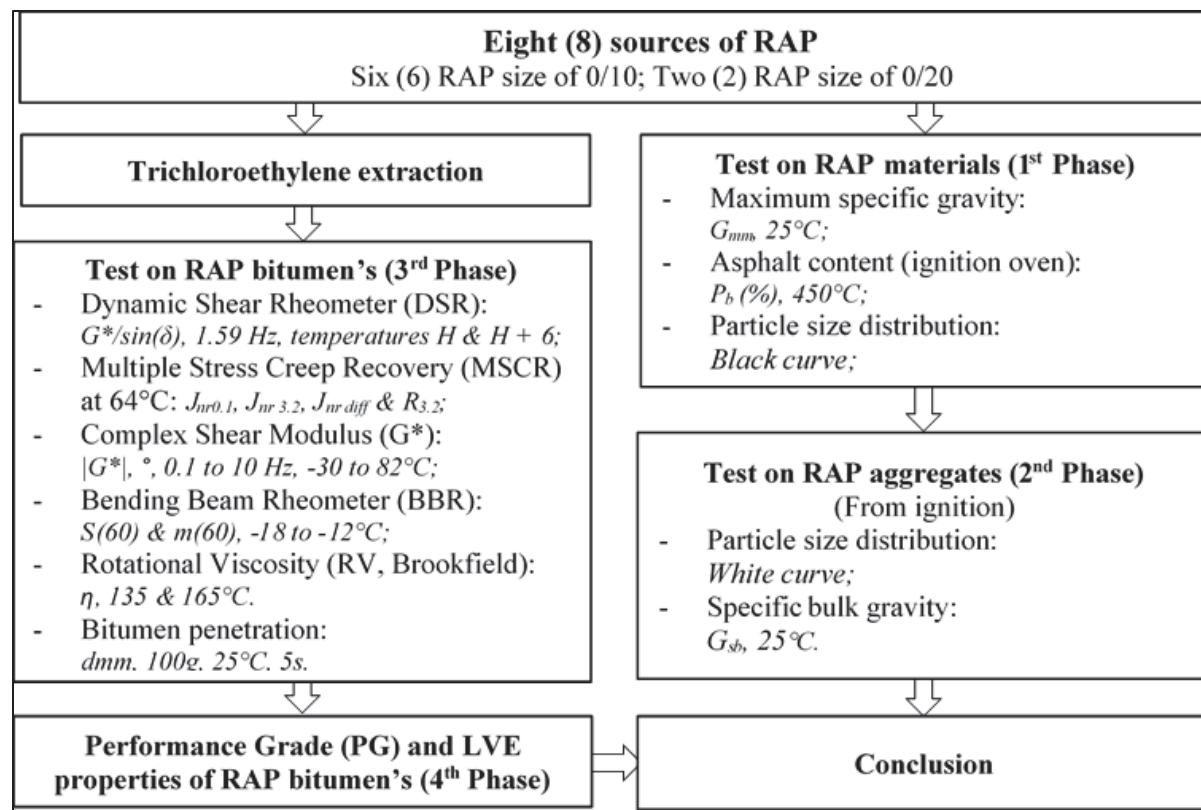


Figure A II.1 Schematic diagram of the research methodology

For RAP bitumen (3rd Phase) that has been extracted with trichloroethylene, tests were done based on the SUPERPAVE Performance Grade (PG) method. The Dynamic Shear Rheometer (DSR) was used to evaluate precisely the high temperature (T_{high}) and the PG grade (H class) following the AASTHO T 315. To have an extended understanding of the linear viscoelastic (LVE) behavior, complex shear modulus (G^*) tests have been conducted at varying temperatures (from -30 to 82 °C) and frequencies (from 0.1 to 10 Hz).

The rutting performance (elastic recovery, non-recoverable creep compliance and compliance delta properties) of the RAP binders were evaluated with the Multiple Shear Stress Creep Recovery (MSCR) test on DSR apparatus according to AASHTO T 350 standard at temperature of 64 °C. The Bending Beam Rheometer (BBR) was used to determine the low temperature (T_{low}) and the PG grade (L class) of the RAP binders by recording the creep

stiffness $S(60)$ and the stiffness slope $m(60)$ at 60 seconds were evaluated. BBR tests were done at -12 and -18 °C.

The rutting performance (elastic recovery, non-recoverable creep compliance and compliance delta properties) of the RAP binders were evaluated with the Multiple Shear Stress Creep Recovery (MSCR) test on DSR apparatus according to AASHTO T 350 standard at temperature of 64 °C. The Bending Beam Rheometer (BBR) was used to determine the low temperature (T_{low}) and the PG grade (L class) of the RAP binders by recording the creep stiffness $S(60)$ and the stiffness slope $m(60)$ at 60 seconds were evaluated. BBR tests were done at -12 and -18 °C.

Rotational viscosity (RV) tests were conducted at 135 and 165 °C (AASHTO T 316 standard). After, considering the viscosity of 0.17 and 0.28 Pa·s, the mixing and the compaction temperatures are established, respectively. To evaluate the consistency of the RAP binder, the penetration test was achieved following the ASTM D5 standard at 25°C to find out the value of dmm. Finally, the DSR, BBR and MSCR results are used to define the PG H-L or PG Hn-L of the bitumen and the results of the G^* tests define the LVE behavior of bitumen (4th phase).

A II.4 Experimental plan

Tableau A II.1 presents results of RAP materials and RAP aggregates tests. On maximum specific gravity tests (G_{mm}), the densest RAP material is the RAP-7 (0/20) with a value of 2.607, which could be an indicator of one of the lowest bitumen contents (P_b) and one of the highest aggregate densities in the mix (G_{sb}). The least dense RAP material is the RAP-3 (0/10) with a value of 2.520, which could mean that is in the richest RAP in terms of P_b and the G_{sb} is one of the highest.

Tableau A II.1 RAP and RAP Aggregates Properties

Properties	RAP-1 (0/10)	RAP-2 (0/10)	RAP-3 (0/10)	RAP-4 (0/10)	RAP-5 (0/10)	RAP-6 (0/10)	RAP-7 (0/20)	RAP-8 (0/20)
P_b (%)* (n = 3)	5.35	5.93	5.39	4.58	5.25	4.32	4.41	4.37
G_{mm} (n = 2)	2.558	2.565	2.520	2.569	2.592	2.594	2.607	2.570
G_{sb} (n = 2)	2.793	2.817	2.759	2.777	2.799	2.772	2.778	2.756
G_{se} (n = 2)	2.802	2.842	2.756	2.775	2.839	2.792	2.813	2.766
Correction factor**	-0.10	-0.11	-0.10	-0.09	-0.10	-0.08	-0.08	-0.08
P_{b, real} (%)***	5.45	6.05	5.49	4.67	5.34	4.40	4.49	4.45
* Ignition oven results without correction factor (P_b). ** Correction factor = $P_b - \left(\frac{1/G_{mm} - 1/G_{se}}{1/G_b - 1/G_{se}} \times 100 \right)$ with a $G_b = 1.0079$ (specify gravity of bitumen). *** P_{b, real} = P_b - correction factor.								

Figure A II.2 Particle Size Distribution Before Ignition (left) and After Ignition (right) presents the particles size analysis before and after ignition. For the particle size distribution of the RAP materials and RAP aggregates, it is important to say that it was the same specimen for both tests. Black curve has been done firstly and then put in the ignition oven to do the white curve afterward. For all the mixes, the particle size distributions of the RAP aggregates are finer than RAP asphalt due to the particle coated together with asphalt. On average, 10% more particles are passing through all the sieves. The particle size distributions after ignition are more similar because particles are not clustered together with bitumen. The RAP-6 is slightly finer than the others RAP 0/10 and the two RAP 0/20 are the bigger. For mix design, the white curve is used.

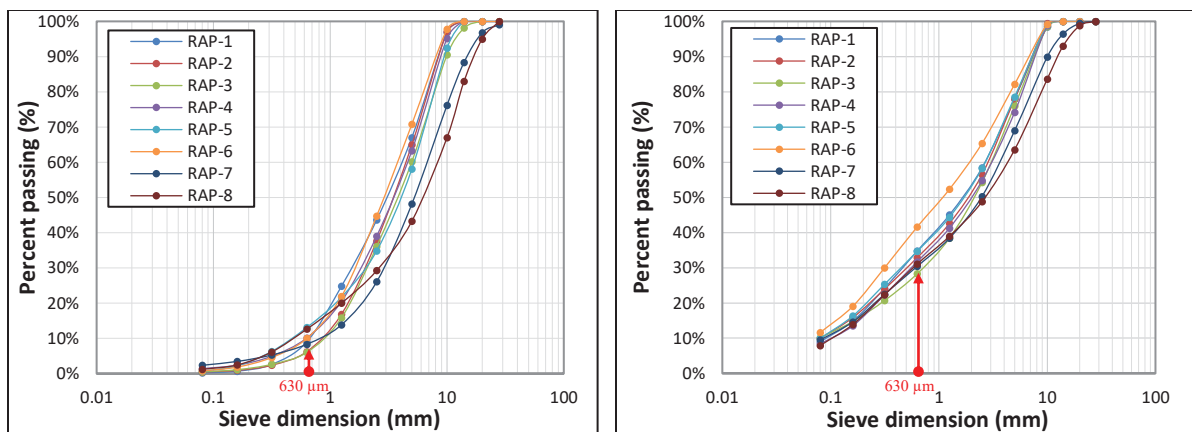


Figure A II.2 Particle Size Distribution Before Ignition (left) and After Ignition (right)

A-II.5 RAP Bitumen Properties

Tableau A II.2 shows results obtained on extracted binders from RAP. Penetration test shows that the consistence of the RAP binder is very hard at 25°C. The softest binder is the RAP-5 with a penetration of 35 dmm followed by RAP-8 and RAP-9 with a penetration of 26 dmm and 20 dmm, respectively. Other RAP binders show results below 15 dmm.

Viscosity (RV) results show that mixing temperatures vary from 185°C to 212°C. RAP-8 shows the lowest viscosity and the highest viscosity is obtained with the RAP-4 bitumen. Lower mixing temperature might be an indicator that the RAP binder will blend easily with the virgin bitumen during the mixing process. Depending on the virgin binder used, a maximum mixing temperature must be respected to not overoxidize the mixes. Compaction temperatures follow the same trend as mixing temperature. From 135°C to 165°C, the variation rate of the viscosity is 80% on average with a standard deviation of 2.9% for all the binders.

Tableau A II.2 RAP Bitumen Properties

Test (temp.)	Bitumen properties (unit)	RAP-1 (0/10)	RAP-2 (0/10)	RAP-3 (0/10)	RAP-4 (0/10)	RAP-5 (0/10)	RAP-6 (0/10)	RAP-7 (0/20)	RAP-8 (0/20)
MSCR (64°C)	Elastic recovery, $R_{3.2}$ (%)	41.7	54.3	55.0	42.5	35.3	42.3	31.0	35.8
	Non-rec. Creep comp., $J_{nr3.2}$ (kPa ⁻¹)	0.266	0.089	0.055	0.051	0.499	0.251	0.499	0.469
	Compliance delta, $J_{nr\ diff}$ (%)	19.6	16.5	38.1	9.1	68.4	14.4	65.5	24.4
	Traffic class (letter)	E	Fail	Fail	Fail	Fail	E	Fail	Fail
Pene. (25°C)	Penetration (dmm)	15	13	13	13	35	12	20	26
RV	(135°C) η (Pa·s)	1.808	3.680	6.384	6.072	1.724	2.284	1.872	1.564
	(165°C) η (Pa·s)	0.387	0.623	1.024	1.108	0.408	0.468	0.404	0.368
	Mixing T (°C)	186	195	207	212	188	190	187	185
	Compaction T (°C)	173	182	193	197	174	177	174	172
BBR	(-12°C)	m(60s) (---)	0.345	0.309	0.329	0.290	0.290	0.315	0.371
		S(60s) (MPa)	123	220	144	330	330	154	85.5
	(-18°C)	m(60s) (---)	0.293	0.257	0.286	0.238	0.259	0.273	0.321
		S(60s) (MPa)	253	441	262	597	240	304	137
	T_{low} (°C)		-27.2	-23.0	-26.1	-20.9	-24.5	-24.2	-31.9
DSR	T_{high} (°C)		88.5	96.3	98.7	100.5	84.0	89.0	82.9
DSR+BBR		PG (H-L)	88-22	94-22	94-22	100-16	82-22	88-22	82-28
DSR+BBR+MSCR		PG (Hn-L)	64E-22	none	none	none	none	64E-22	none

On MSCR results, all the binders show low non-recoverable creep compliance ($J_{nr3.2}$) and elastic recovery ($R_{3.2}$). On $J_{nr3.2}$, all the results are below 0.5, which is an indication of a good rutting resistance. Figure A II.3 presents the relation between the results of $R_{3.2}$ and $J_{nr3.2}$. On Figure A II.3, the bitumen must be over the line to have a letter (E, V or H).

If the $R_{3.2}$ is not high enough, it is considered a failure. Almost all the RAP's bitumen are on the limit to be considered as E, but $R_{3.2}$ is too low, except for RAP-1 and RAP-6. The compliance delta ($J_{nr\ diff}$) must be under 75% to be considered conform and this parameter is

not used for E grade. It is noted that no aging has been done on the RAP binder before testing, because they are considered already oxidised.

BBR results show that the low temperature gradings of the RAP binders vary from -20.9°C (RAP-4) to -31.9°C (RAP-7). For all RAP binders, the temperature grading is obtained with the slope and the stiffness criteria: $m(60)$; $S(60)$. On DSR tests, results show that the high temperature gradings vary from 82.9 to 100.5°C . RAP-4 looks like the most oxidised binder and RAP-7 seems to have the best properties for cold climate (lowest T_{low}). Even if all the RAP are coming from the same region, they don't have the same PG grade. It might be due to the oxidation level of the RAP and the type of bitumen originally used.

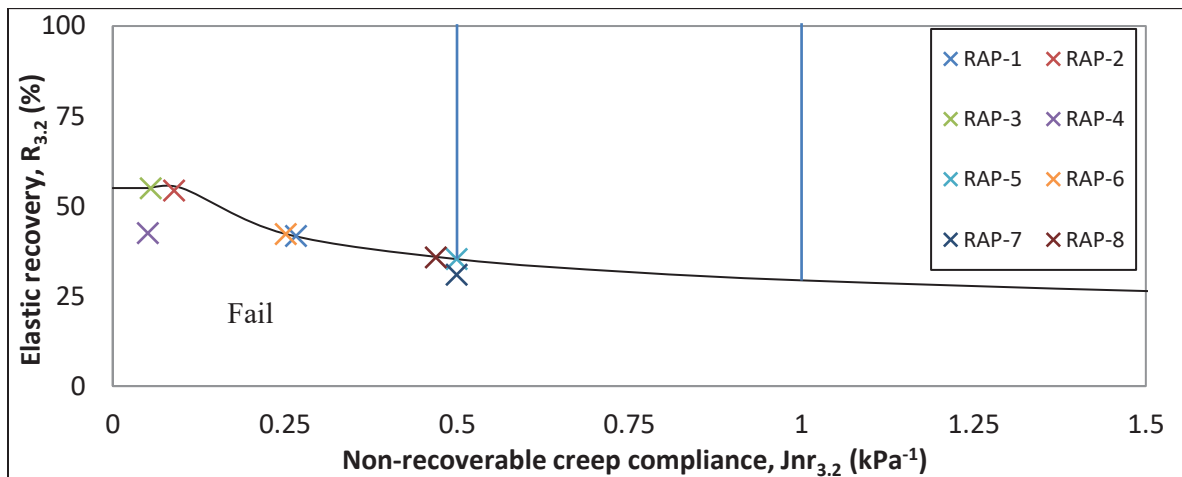


Figure A II.3 Relationships Between the MSCR Elastic Recovery and the Non-Recoverable Creep Compliance at the Stress Level of 3.2 kPa

A-II.6 LVE characterisation of RAP's bitumen

The complex shear modulus (G^*) test results of RAP bitumen's displayed on Figure A II.4. For the sake of comparison, a standard PG 52S-34 was additionally tested. As shown in the Black Space in Figure A II.4a, the bitumen's followed appeared thermo-rheologically simple, forming a single curve, and therefore follow Time-Temperature Superposition Principle (TTSP). The TTSP was successfully modeled with William-Landel-Ferry (WLF) equation, as shown in Figure 4b, and the master curves of the norm of G^* were built (Figure A II.4c). The

2S2P1D model was calibrated for all bitumens and simulates $|G^*|$ very accurately (max. 10% discrepancy) over up to high (8) orders of magnitude.

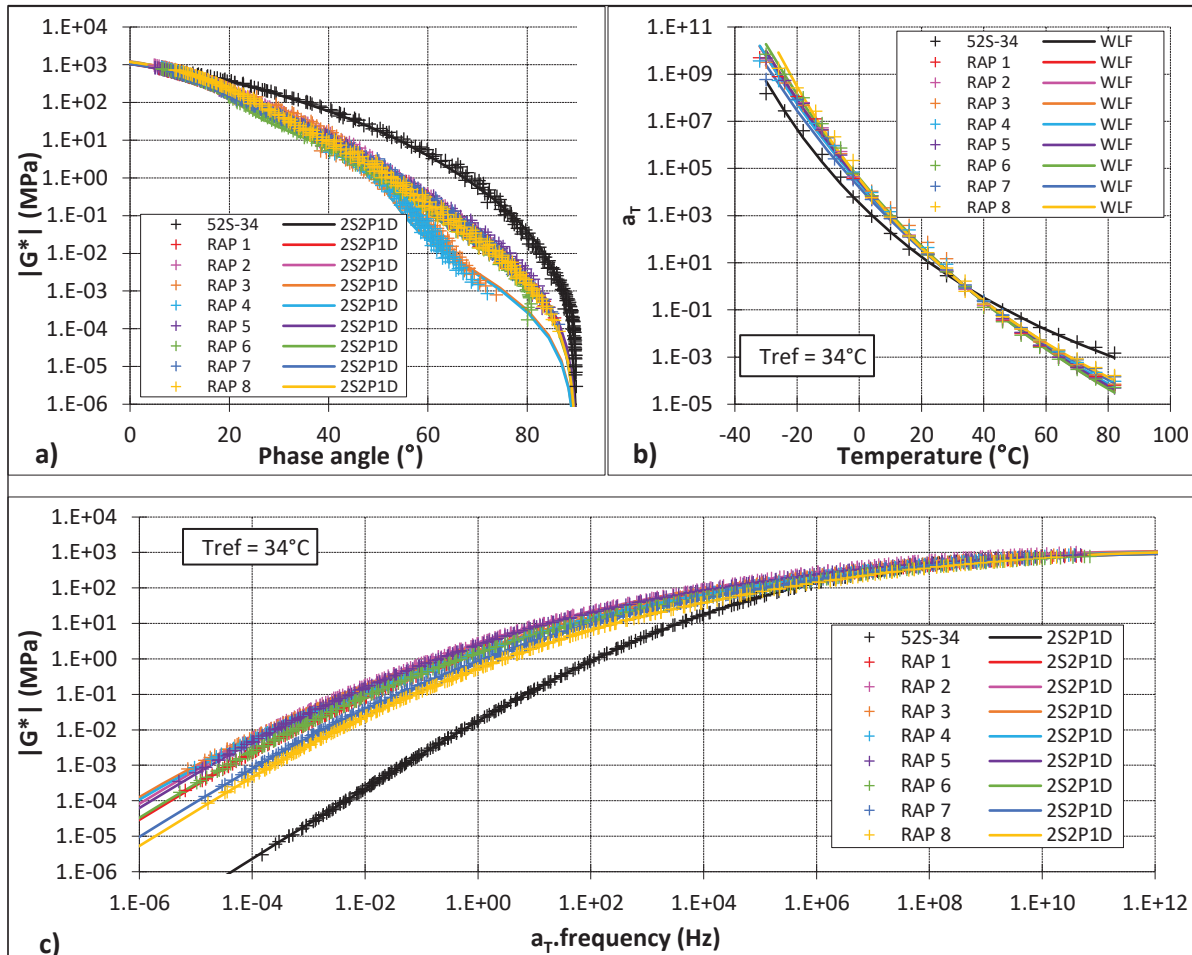


Figure A II.4 Complex Shear Modulus Test Results (-30 to 82°C ; 0.1 to 10 Hz):

- a) G^* in Black Space, b) Shift Factor as a Function of Temperature and,
c) Master Curve of $|G^*|$

The glassy moduli (or the asymptotic modulus) of all bitumens does not vary a lot (from 1,040 to 1,220 MPa) i.e. the LVE behaviour at low temperature and high frequency are comparable. At high temperature and low frequency, the RAP binders are significantly less thermo-sensitive when compared to the virgin PG 52S-34 bitumen, and are 2 to 3 orders of magnitude stiffer. Hence, the effect of oxidation of RAP is clear at high temperature and low frequency. A closer observation shows that the variations of $|G^*|$ between RAP sources spread over an order of

magnitude at the higher temperature and low frequency. In particular, the binders from RAP 0/20 sources appeared softer than RAP 0/10 sources.

A-II.7 Conclusion

The aim of this paper is to compare eight (8) sources of RAP from the same northern region, which is the southwest of Quebec, in Canada. Four (4) phases of tests were done on all RAP: materials, aggregates and bitumens.

Tests on RAP materials and RAP aggregates have shown that biggest difference is the bitumen content, but the specific gravity and the particles size distribution (white and black curves) are similar.

The biggest change was observed on RAP bitumen properties, where most of the RAP showed different results between them on almost all the tests. In general, RAP's bitumen showed hard consistency (12dmm to 35dmm), high temperature grading (H: 82°C to 100°C), high mixing (185°C to 212°C) and compacting temperatures (172°C to 197°C) and low temperature grading (L: -28°C to -16°C). MSCR results have shown that the majority of the RAP bitumens are on the limit of the $R_{3.2}$ criteria, which is good for aged binder. LVE results gave a good idea of the bitumen behaviour on a range of temperature-frequency and showed that it could be used on RAP bitumen.

The results are indication that RAP bitumen's characterisation is necessary to incorporate a high amount of RAP material in new mix asphalt. A method of the bitumen characterisation without extraction could be an advancement in the pavement industry.

ANNEXE III

LABORATORY STUDY: ASSESSING BITUMEN BLENDING CHARTS FOR ASPHALT MIXES WITH RECYCLED ASPHALT PAVEMENT

Marc-André Bérubé^{1*}, Sebastien Lamothe¹, Kevin Bilodeau² and Alan Carter¹

*corresponding author

¹ marc-andre.berube.3@ens.etsmtl.ca, École de technologie supérieure, Canada

² Groupe Bauval, Canada

Article présenté à la conférence « *International Society for Asphalt Pavement (ISAP)* », juin 2024

A III.1 Abstract

This laboratory study focuses on validating the bitumen blending charts for asphalt mix performance. The laboratory research program involves comprehensive testing of asphalt mixes, including the: evaluations of volumetric properties, compactability, rutting performance, and viscoelastic behavior. The study examines the influence of varying levels of Reclaimed Asphalt Pavement Material (RAPM) content, ranging from 0 to 100 % and constituting five asphalt mixes, on MUN-10 Quebec mix, a type of hot mix asphalt (HMA) used as a surface layer for municipalities. In the mix design process, RAPM extracted bitumen, classified as PG 82–22, is combined with a virgin bitumen PG 52S–34 when RAPM content is below 100 % by aiming similar volumetric properties as effective binder percent and gradation. The study explores the degree of mobilization of RAPM bitumen, considering its characterization as a black rock or its contribution as a binder, as determined through performance tests. The insights collected from this study contribute significantly to validating and practically applying the bitumen blending chart as a tool for projecting asphalt mix performance or attributes. By understanding the impact of RAPM, this research provides valuable insights for optimizing asphalt mix designs and enhancing the sustainability of asphalt pavement construction.

Keywords: Recycled Asphalt Pavement Material (RAPM), Asphalt mix performances, Blending chart.

A III.2 Introduction

The advancement of asphalt pavement technology has been driven by the escalating demand for road infrastructure that is both sustainable and long-lasting. The incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement Material (RAPM) into asphalt mixes has gained prominence as a promising strategy for attaining environmental and economic advantages (EAPA, 2014; AAPA, 2018; Zaubanis et Mallick, 2015). To ensure the successful integration of RAPM, it is imperative to possess a comprehensive understanding of its influence on mix performance. While blending charts for bitumen are a common industry tool used to determine the optimal RAPM content, their application to asphalt mixes is less prevalent (Mangiafico & al., 2014; Norton & al., 2014). Even in some cases, the mixing charts were not conclusive (Carter, 2005). This paper presents a laboratory study that focuses on assessing the feasibility of employing a blending chart to forecast the performance of asphalt mixes incorporating varying levels of RAPM. The investigation delves into the potential of the blending chart, leveraging volumetric properties and binder characteristics, to effectively guide the design and evaluation of asphalt mixes that integrate sustainable materials. The primary objective of this study is to explore the adaptability of the blending chart in projecting vital mix performance metrics encompassing compactability, rutting resistance, and viscoelastic behavior. In addition, the study investigates into examining the influence of this RAPM bitumen source in the mix, discussing its classification as either a black rock or a binder.

A III.3 Experimental program

A III.3.1 Materials

The materials used in this study include virgin aggregates and a virgin bitumen, along with recycled asphalt pavement (RAPM) materials. The virgin aggregates selected for this research are three types of granite aggregates with particle sizes of 0-2.5, 0-5, and 5-10 mm. The

aggregates were obtained from a quarry and were sampled following the Quebec testing method LC 21-010 (*LC: Laboratoire des chaussées*). In the laboratory, the aggregates were recombined using the quartering method, following Quebec testing method LC 21-015. The selection of these aggregates was based on their robust resistance to attrition, ensuring their suitability for asphalt mixtures. Tableau A III.1 provides a summary of the properties of the virgin aggregates used in this study determined according to the Quebec standard (*BNQ: Bureau de normalisation du Québec*) and LC test methods. The selection of the virgin bitumen for this study was made with the intention of countering the potential adverse effects of RAPM aged and oxidized bitumen on asphalt pavement performance. To achieve this, a softer bitumen grade, PG 52S-34, was chosen. The use of a softer bitumen helps mitigate issues associated with aging and oxidation, which can negatively impact the durability and flexibility of asphalt mixtures (He & al., 2008). Tableau A III.2 presents a summary of the properties of the virgin PG 52S-34 and RAPM extracted bitumens used in this study. The bitumen usually used for Montreal area and traffic is a PG 64E-28.

Tableau A III.1 Virgin aggregates properties

Property	Unit	Result			Test method or standard
		0-2.5	0-5	5-10	
Friability	%	25	25	---	LC 21-080
Micro-Deval (MD)	%	23	20	7	LC 21-070; -101
Los-Angeles (LA)	%	---	---	22	LC 21-400
Crushed particles	%	100	100	100	LC 21-100
Particle content < 5 µm	%	0	2.5	---	BNQ 2501-025
Bulk density gravity (G_{sb})	---	2.723	2.718	2.721	LC 21-065
Absorption (abs)	%	0.29	0.40	0.49	LC 21-066

Tableau A III.2 Virgin bitumen and RAPM extracted bitumen properties
Tirée de Bérubé & al. (2024)

Property	Unit	Result		Standard
		Virgin	RAPM ¹	
High-temperature (T_{high})	°C	52.7	84.0	AASTHO T315
Low-temperature (T_{low})	°C	-34.9	-24.0	AASTHO T313
Creep compliance ($J_{\text{nr}3.2}$)	kPa ⁻¹	3.18	---	AASTHO T350
Performance grade, PG (Hn-L)	°C	52S-34	82-22	---
Mixing temperature ($T_{\text{mix.}}$)	°C	136	174	AASTHO T316
Compaction temperature ($T_{\text{comp.}}$)	°C	125	161	AASTHO T316

¹ Extracted with trichloroethylene. No aging has been applied before testing the RAPM bitumen.

A III.3.2 Methodology

In this laboratory study, five RAPM content were selected (0, 15, 30, 45 and 100 %). The first step of this study involved combining the selected aggregates and the RAPM aggregates to obtain a gradation that closely resembled the mix with 100 % RAPM. The gradation of the mixes and the specification of the Quebec mix MUN-10 (standard 4202 of *ministère des Transports et de la Mobilité durable: MTMD*) are shown in Figure A III.1. All asphalt mixes in this study adhere to the specifications.

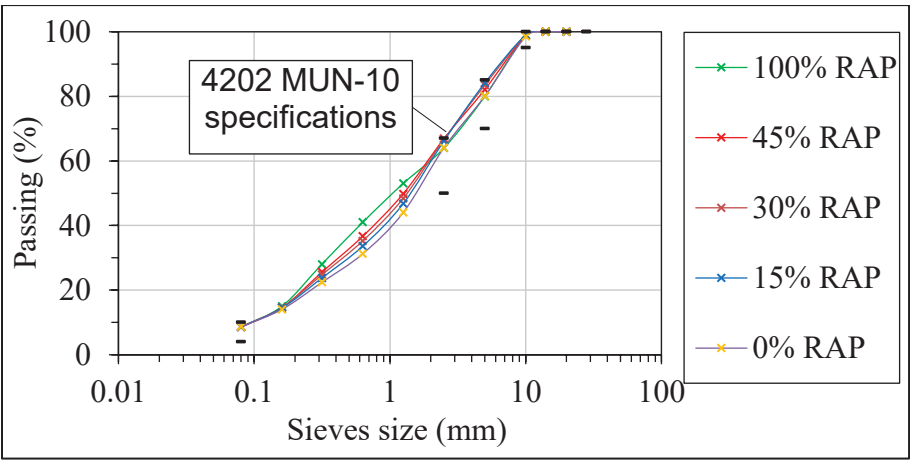


Figure A III.1 Gradation of the study mixes

In the second step of the study, the establishment of the "equivalent binder content", which signifies the quantity of binder in the mixture that provides the same effective binder content (P_{be}) as a mix containing 100 % RAPM material without any additional virgin bitumen. To establishing the equivalent binder content and the volumetric properties, the maximum specific gravity test (G_{mm}) following the LC 26-045 Quebec test method. For each RAPM content mix, two sets of samples were created by mixing manually by using a heated spoon and a bowl. For the first sample, the initial binder content (initial P_b) was determined through the LC Quebec mix design guidelines. The second sample had the initial binder content raised by 0.5 % of the total mixture weight. Throughout the preparation of all five mixes, mixing temperature was 140 °C and a curing phase of 2 hours at 130 °C preceded the test, which are the temperature recommended by the MTMD. This two-hour provided insights into the absorption of bitumen by the aggregates. By interpolating these data points, the equivalent effective bitumen content (P_{be}) was derived.

After, the asphalt mixes were mixed using a thermoregulated mixer at 140 °C. The mixing process was conducted for 60 seconds, followed by an additional 160 seconds to ensure thorough blending and homogeneity. Previous study showed that a longer mixing time increase the blending of the virgin and RAPM bitumens (Bérubé & al., 2023). A first batch of 16 kg was mixed to prepare samples for a range of tests, including volumetric properties and compaction using the G_{mm} test and SuperPAVE Gyratory Compactor (SGC) device. These tests were conducted in accordance with the Quebec test methods LC 26-045 and LC 26-003, respectively. To evaluate the resistance of the permanent deformations, the rutting test, two batches of 12.5 kg each were prepared for each mix. These batches were then compacted without aging (No aging: NA in Tableau A III.3) into slabs with dimensions of 50 x 180 x 500 mm³ with the LCPC compactor, following the LC 26-400 Quebec test method. The rutting resistance of the asphalt mixes was subsequently assessed using these slabs with the LC 26-410 Quebec test method. For the complex modulus test, two batches of 42 kg each were mixed and aged at 130 °C for two hours, and the compaction process involved forming slabs with dimensions of 600 x 400 x 125 mm³, adhering to the LC 26-400 test method. The viscoelastic behavior of the asphalt mixture was evaluated through the complex modulus test using these

slabs by coring them into cylindric specimens of Ø 75 mm x 150 mm length. The 2S2P1D model has been used for modeling the viscoelastic behavior of the material. The compaction temperature for all samples was maintained at 130 °C, ensuring consistency in the testing conditions. Tableau A III.3 provides a comprehensive overview of the tests conducted in this study, the aging state and the testing condition.

Tableau A III.3 Tests and testing conditions of the study

Test	Property	Aging ¹	Testing temperature	Testing method
Max. spec. gravity (G_{mm})	Volumetric prop.	STA	25 °C	LC 26-045
SGC (SuperPAVE device)	Compactability	STA	130 °C	LC 26-003
Rutting (MLPC rut tester)	Permanent def.	NA	52 °C	LC 26-410
Complex modulus (E^*)	Viscoelastic behav.	STA	35 to -35 °C	LC 26-700
¹ NA: No Aging, which is more critical in terms of mixture rutting; STA: Short-Term Aging (130 °C for two hours).				

A III.4 Results and Discussion

A III.4.1 Volumetrics Properties

Tableau A III.4 displays the volumetric properties of the studied asphalt mixes. The percent of effective binder (P_{be}) exhibits negligible variation among all mixes, with the largest difference being 0.08 %. This indicates that the mixes can be compared without factoring in the influence of bitumen content. The volume of effective asphalt binder (V_{be}) demonstrates a slightly higher variation of 0.16 %, attributed to the specific gravity of the combined aggregates and RAPM. The dust to effective binder ratio ($80 \mu\text{m}/P_{be}$) exhibits consistent values across all mixes, with the highest variation being 0.04. The standard value falls within the spectrum of 0.6 to 1.2, indicating a relatively elevated concentration of filler in the mastic of the studies mixes (McDaniel et Anderson, 2001). The asphalt film thickness (AFT) also demonstrates uniformity across all mixes, falling within the range of 4.88 to 5.27 μm , which the generally recommended range of 6 to 8 μm (Kandhal et Chakraborty, 1996). Mixes AFT values are low, due to the

RAPM we had and by avoiding the addition of virgin bitumen, but they can be compared. The total asphalt binder content (P_b) variations are observed based on the percent of absorbed binder (P_{ba}) and the RAPM asphalt binder content ($P_{b, \text{RAPM}}$). The 100 % RAPM mix, without additional bitumen, shows bitumen absorption, indicating that RAPM bitumen does not fully contribute to the aggregate coating and mix cohesion, but considered 100 % mobilizable. Voids at N_{Design} (V_a) are significantly higher in mixes containing 0 and 15 % RAPM but decrease with higher RAPM content. Conversely, voids in mineral aggregates (VMA) show similarity for mixes containing 0 to 45 % RAPM, with lower values observed for the 100 % RAPM mix. The reverse is observed for the voids filled with asphalt (VFA). From those results, it is not possible to evaluate the RAPM bitumen mobilization.

Tableau A III.4 Volumetric properties of the study mixes

Mix property	Unit	RAPM content (%)				
		0	15	30	45	100
Percent of effective binder (P_{be}) ¹	%	4.50	4.57	4.54	4.52	4.58
Volume of effective asphalt binder (V_{be}) ^{1,2}	%	11.22	11.37	11.31	11.27	11.38
Dust to effective binder ratio (80 $\mu\text{m}/P_{be}$)	---	1.92	1.88	1.90	1.88	1.88
Surface area for the aggregate (SSA) ³	m^2/kg	8.81	9.08	9.25	9.31	9.69
Asphalt film thickness (AFT) ³	μm	5.27	5.20	5.07	4.99	4.88
Total asphalt binder content (P_b) ⁴	%	4.97	5.02	5.02	5.15	5.06
RAPM asphalt binder content ($P_{b, \text{RAPM}}$)	%	0.00	0.76	1.52	2.28	5.06
Voids at $N_{\text{Design}} = 80$ gyrations (V_a) ^{1,5}	%	6.8	7.3	6.5	5.9	3.2
Voids in the mineral aggregate (VMA) ^{1,3,5}	%	17.2	17.9	17.0	16.5	14.2
Voids filled with asphalt (VFA) ^{1,3,5}	%	65.1	63.6	66.4	68.4	80.0
Percent of absorbed binder (P_{ba}) ^{1,3}	%	0.48	0.46	0.49	0.65	0.49

¹ Based on Quebec test method LC 26-045.

² V_{be} calculated at 0 % air voids (V_a).

³ Based on Quebec test method LC 26-900.

⁴ Constituting the total of added bitumen and RAPM bitumen considered 100 % mobilizable.

⁵ Based on Quebec test method LC 26-004.

A III.4.2 Compactability

Figure A III.2 illustrates the results from the SuperPAVE Gyratory Compactor (SGC) tests, along with the Quebec specifications for the MUN-10 mix (MTMD 4202 standard). Given that all mixes were compacted at the same temperature (130 °C), with similar volumetric properties (Table 4) and gradations (Fig. 1), the effect of increasing RAPM content on compactability can be observed in Fig. 2. Overall, the V_a in the mixes decrease linearly with the increase in

RAPM content. This could be attributed to the coated and rounder shape of RAPM aggregates compared to virgin aggregates. The lowest V_a is obtained with the 100 % RAPM content mix, which does not meet specifications at 10 and 80 gyrations but complies with the 200-gyrations criterion. Conversely, mixes containing 0, 30, and 45 % of RAPM achieve all the specifications of the MUN-10 mix. However, the mix with 15% RAPM does not achieve the 80 gyrations criterion, recording a value of 7.3%. Based on the obtained results, it becomes feasible to predict the compactability of mixes containing more than 15 % of RAPM and it is not possible to evaluate the RAPM bitumen contribution since RAPM aggregates can affect the results.

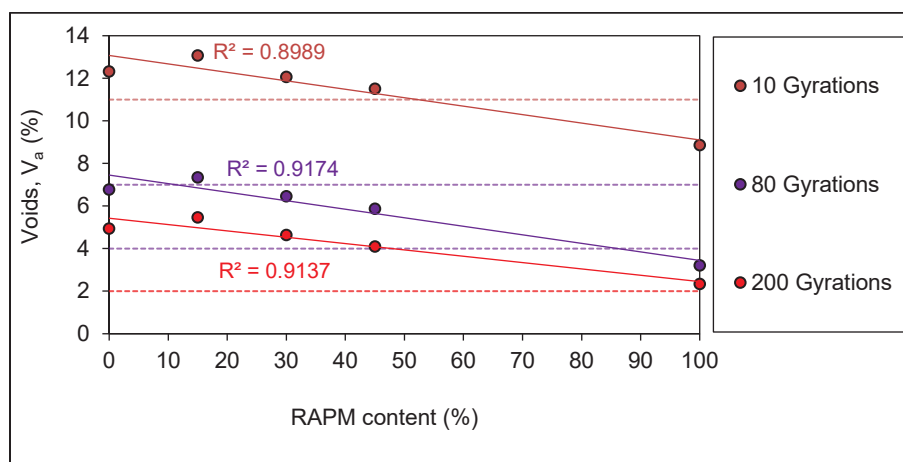


Figure A III.2 Superpave gyratory compactor (SGC) voids results at 10, 80 and 200 gyrations

A III.4.3 Permanent Deformation

Figure A III.3 displays the rut depth of all the mixes after 1,000, 3,000, 10,000, and 30,000 cycles. Permanent deformation exhibits a linear relationship with the increase in RAPM content. A stronger correlation with permanent deformation is observed compared to compactability. The MUN-10 mix does not have specific rut depth requirements. However, all the mixes in the study demonstrate rut depths lower than 10 % after 1,000 cycles and lower than 15 % after 3,000 cycles, indicating good performance for surface layer mixes. Notably, the mix containing 100 % RAPM showcases exceptional performance in terms of permanent deformation, with a rut depth lower than 5 % after 30,000 cycles. These results affirm the

applicability of the blending chart in predicting the permanent deformation performance of asphalt mixes and showed that 100 % of the RAPM binder contribute to the cohesion of the material.

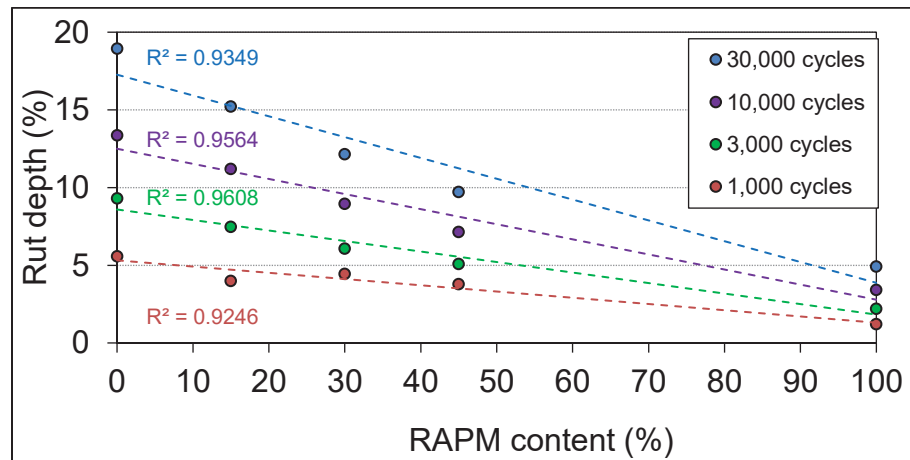


Figure A III.3 Measured Rut depth in function of RAPM content

A III.4.3 Viscoelastic Behaviour

Figure A III.4 shows the complex modulus results with their 2S2P1D modelling. The mix with 100 % RAPM content exhibits the lowest phase angle (ϕ) for all reduced frequencies compared to other mixes, followed by the 45, 30, 15, and 0 % RAPM content mix (Figure A III.4a). Conversely, the stiffness ($|E^*|$; Figure A III.4b) shows the opposite trend, with the 100 % RAPM mix displaying the highest stiffness, while the 0 % RAPM content mix shows the lowest stiffness. Fig. 4c demonstrates a linear correlation between the $|E^*|$ and the ϕ with respect to the RAPM content. This observation indicates that the blending chart can effectively be applied for stiffness and phase angle prediction. This strong correlation shows that the bitumen from RAPM contribute to the cohesion on the material and 100 % of the bitumen can be considered as a binder. The choice of this temperature-frequency combination (10 °C – 10 Hz for Figure A III.4c) is based on its common usage in specifications in Quebec and France. However, a similar linear trend is observed when employing a different temperature-frequency couple.

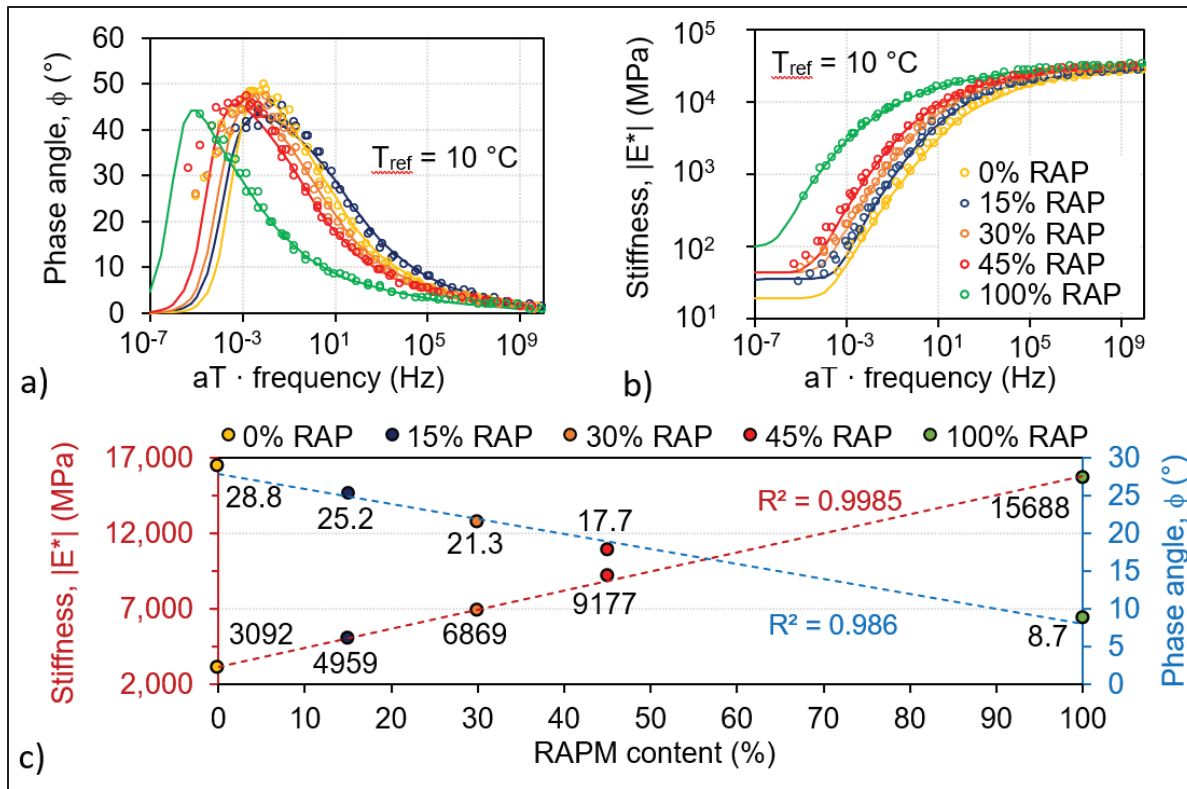


Figure A III.4 Complex modulus results: a) Master curve of the phase angle in function of the reduced frequency; b) Master curve of the stiffness in function of the reduced frequency (T_{ref} : Reference temperature) and; c) Stiffness and phase angle at $10^\circ\text{C} - 10\text{ Hz}$ in function of RAPM content.

A III.5 Conclusion

In conclusion, this study aimed to assess the applicability of the blending chart on mix performance, specifically focusing on asphalt mixes with varying RAPM content. The volumetric properties, including dust to effective binder ratio, percent of effective binder, and gradation, remained consistent across all the mixes, allowing for a fair evaluation.

The findings indicate that the blending chart can indeed be successfully applied to predict mix performance. Notably, the strongest correlation was observed in terms of viscoelastic behavior ($|E^*|$, the stiffness vs the phase angle, ϕ), reaffirming the chart's effectiveness in predicting this aspect of mix performance. Additionally, strong correlations were also observed in compactability and rutting, further supporting the chart's reliability. The bitumen from the

RAPM functioned entirely as a binder, with no observed of black rock. These observations align with the results of permanent deformation and viscoelastic behavior testing.

To validate a generic blending chart at various mixture levels, it is essential to employ the same approach using an alternative source of RAPM to assess the presence of a linear trend. The use of an older or more oxidized RAPM might reveal that not all bitumen functions as a binder and may be categorized as a black rock. Future studies could explore additional mix performance aspects, such as thermal cracking and crack propagation, to gain a more comprehensive understanding of the blending chart's predictive capabilities.

ANNEXE IV

FICHES DESCRIPTIVES DES BITUMES D'APPORTS



SUNCOR
ÉNERGIE

Raffinerie de Montréal
11701, rue Sherbrooke Est
Montréal, Qc H1B 1C3

Liant bitumineux

Classe de performance : PG 52S-34

Fabricant : Produits Suncor Énergie SENC

Lieu d'entreposage : Terminal Montréal-Est

Réservoir : TME_16

Date de fabrication : 2020-05-18

Date de certification : 2020-05-19

Numéro de lot : 20014

Numéro de référence du lot : 20051644

Numéro de référence du contrôle : 20051644

<u>Températures recommandées</u>	<u>min</u>	<u>max</u>
Températures d'entreposage (°C) :	140	175
Températures de malaxage (°C) :	128.5	142.5

Certificat d'analyse

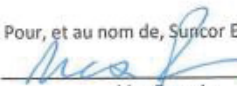
Analyses	Méthodes	Unités	Exigences			Résultats
			min		max	
Masse volumique à 25°C	ASTM D70	g/cm ³		Indiquer		1.0171
Viscosité rotationnelle à 135°C	AASHTO T316	Pa*s			3	0.171
Viscosité rotationnelle à 165°C	AASHTO T316	Pa*s		Indiquer		0.058
Stabilité au stockage	LC 25-003	°C			2	0.3
Point de ramollissement moyen	LC 25-003	°C		Indiquer		34.5
Point éclair	ASTM D92	°C	230			290
Teneur en cendres	ASTM D8078	%			0.50	0.04
Variation de masse RTFOT	AASHTO T240	%			1.00	-0.653
G*/sinδ bitume d'origine à 52°C	AASHTO T315	kPa	1.00			1.10
Te		°C	52			52.7
Tb		°C			-34	-34.9
Module de rigidité (So)		MPa			172	163
Pente (mo)			0.350			0.458
G*/sinδ bitume vieilli au RTFO à 52°C	AASHTO T315	kPa	2.20			3.12
Recouvrance d'élasticité - 3.2 kPa à 52°C	AASHTO T350	%		Indiquer		0
Non recouvrable - 3.2 kPa à 52°C	AASHTO T350	kPa ⁻¹			4.50	3.18
Différentiel non recouvrable à 52°C	AASHTO T350	%			75	9.3
Module de rigidité (S), bitume vieilli	AASHTO T313	MPa			300	265
Pente (m), bitume vieilli	AASHTO T313		0.300			0.343

Essais de contrôle

Date du contrôle :	2020-05-19					
G*/sinδ bitume d'origine à 52°C	AASHTO T315	kPa	1.00			1.10
Module de rigidité (Sc)		MPa			172	163
Pente (mc)			0.350			0.458
Recouvrance d'élasticité - 3.2 kPa à 52°C	AASHTO T350	%		Indiquer		0
Non recouvrable - 3.2 kPa à 52°C	AASHTO T350	kPa ⁻¹			4.50	3.18
Différentiel non recouvrable à 52°C	AASHTO T350	%			75	9.3

Certificat conforme à la norme québécoise 4101.

Pour, et au nom de, Suncor Énergie



Max Dumais
AI #215



PCM-AQ-DL 914 Rév. 1.0

Date de parution : 2018-01-31

Date de révision : 2019-01-01

Émis le : 19/05/2020

Figure A IV.1 PG 52S-34

MCA		ATTESTATION DE CONFORMITÉ BITUMES		U67-19-38	
Les Industries McAsphalt Ltée		USINE: Salaberry-de-Valleyfield		N° de billet de livraison 224-1047891	
RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX		RECOMMANDATION DES TEMPÉRATURES D'UTILISATION			
Nom du fabricant et lieu de fabrication Les Industries McAsphalt Ltée Salaberry-de-Valleyfield		Entreposage	Minimale 140°C	Maximale 175°C	
Lieu d'entreposage et d'expédition Les Industries McAsphalt Ltée Salaberry-de-Valleyfield		Malaxage à chaud	156 °C	170 °C	
Classe de performance PG 64E-28					
Numéro du lot LOT149941		Date de fabrication 24 Sep. 2019			
RÉSULTATS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION		RÉSULTATS DES ESSAIS DE CONTRÔLE			
Date des essais de caractérisation 24 Sep. 2019		Date des essais de contrôle 24 Sep. 2019			
G*/sin d (kPa) (bitume d'origine) 3.032		G*/sin d (kPa) (bitume d'origine)		3.032	
Température élevée de caractérisation (Te) (°C) 75.2		Module de rigidité S _r (60) (MPa)		105	
Viscosité Brookfield à 135°C (Pa-s) 1.360		Pente m _u (60)		0.453	
Viscosité Brookfield à 165°C (Pa-s) 0.410		Jnr _{3.2} (kPa ⁻¹)		0.11	
Point d'éclair (°C) 318		Jnr _{diff} (%)		74.57	
Stabilité au stockage (°C) 1.0		R _{1.2} (%)		89.41	
TBA Moyenne (°C) 66.3		EXPÉDITION			
Teneur en cendre (%) 0.084		Numéro et nom de la centrale d'enrobage Parage Varennes			
Masse volumique à 25°C (g/cm³) 1.016		Transporteur Smv			
Masse volumique à 15°C (g/cm³) 1.022		N° de la citerne 68		Date du chargement 26/09/2019	Quantité livrée
Enrobage Résiduel (%) N/A		NOTES			
Module de rigidité S _r (60) (MPa) 105					
Pente m _u (60) 0.453					
Variation de masse au RTFO (%) -0.403					
Température de l'essai MSOR (°C) 64					
Recouvrance d'élasticité, 3.2kPa, (%) 89.41					
Comp. non-rec. Jnr, 3.2 kPa, (kPa ⁻¹) 0.11					
Comp. non-rec. diff. Jnr-diff, (%) 74.57					
Niveau de sollicitation "E"					
Température base de caractérisation T _b (°C) -31.2					
REMARQUES					
Préparé par J. Bema, tech.		Date 25 Sep. 2019		Approuvé par Roxana Balba, ing.	
				Date 25 Sep. 2019	
ESPACE RÉSERVÉ AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS					
N° du contrat		Soumis par (organisme de contrôle)			
Prélevé par		À l'usage du laboratoire			
N° du réservoir à la centrale d'enrobage		Température °C		Date de réception	
 LES INDUSTRIES McASPHALT Ltée 11451 Rue Sherbrooke Est T 514.845.1691 TF 1.800.288.4238 Montréal, QC H1B 1C2 T 514.845.4401 E info@mcasphalt.com mcasphalt.com ISO 9001/14001, 18001					

Figure A IV.2 PG 64E-28

ANNEXE V

FICHES DESCRIPTIVES DES GRANUALTS

 ESSAIS SUR MATÉRIAUX GRANULAIRES FINS		N/D : LC-19-0305-00 V/D : -	
CLIENT Sables L.G. (Division de Bauval inc.) PROJET Contrôle qualitatif des matériaux - Essais en laboratoire - Année 2019		N° client: BAUVAL102	
TYPE DE MATÉRIAU Pierre concassée granitique CALIBRE Sable manufacturé (0-2,5 mm) USAGE Enrobé bitumineux, béton de ciment et lit de pose ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ÉCHANTILLONNÉ PAR Client		FOURNISSEUR Bauval CMM/Sables L.G. PROVENANCE St-Hippolyte N° DE RÉF. CLIENT Bon de commande : 8124 N° DE LAB. 157133	
DATE 2019-02-08			
GRANULOMÉTRIE		ESSAIS DIVERS	
CSA A23.2-2A et 5A / LC 21-040			
Tamis (mm)	% Passant	Exigences	
112			
80			
56			
40			
31,5			
20			
14			
10	100		
5	100		
2,5	86		
1,25	59		
0,630	40		
0,315	25		
0,160	12		
0,080	3,9		
		Micro-Deval CSA A23.2-23A (%) 10,3	Friabilité LC 21-080 (Exigence ≤ 40) (%) 24,9
		Densité brute (état sec) CSA A23.2-6A 2,738	Micro-Deval LC 21-101 (Exigence ≤ 30) (%) 23,3
		Densité brute (état SSS) CSA A23.2-6A 2,743	Teneur en eau LC 21-200 (%) 2,743
		Densité brute (apparente) CSA A23.2-6A 2,753	Densité brute (état sec) LC 21-065 2,743
		Absorption CSA A23.2-6A (%) 0,20	LC 21-066 2,734
		Masse volumique CSA A23.2-10A tassée (kg/m³) 1768	Combiné 2,742
		non-tassée (kg/m³) 1558	Densité brute (état SSS) LC 21-065 2,748
		Mottes d'argile et particules friables CSA A23.2-3A (%) 0,5	LC 21-066 2,742
		Teneur en particules légères CSA A23.2-4A (%) 0,0	Combiné 2,760
		Indice colorimétrique CSA A23.2-7A Couleur comparative 0	Densité brute (apparente) LC 21-065 2,748
		Propreté (80µm) CSA A23.2-5A (%) 2,1	LC 21-066 2,756
		Réaction alcalis granulat 1 an CSA A23.2-14A (%) 1,3	Combiné 2,742
		Réaction alcalis granulat Expansion accélérée CSA A23.2-25A (%) 2,78	Absorption (%) LC 21-065 0,20
		Durabilité (MgSO4) CSA A23.2-9A perte > 5mm (%) 1,3	LC 21-066 0,30
		perte < 5mm (%) 1,3	Combiné 0,22
		Module de finesse CSA A23.1-04 2,78	Masse volumique LC 21-060 tassée (kg/m³) 1768
		Équivalent de sable ASTM D2419 91	non-tassée (kg/m³) 1558
			pourcentage de vides
			Bleu de méthylène LC 21-255 (%) 101
			Matières Organiques LC 31-228 (%) 101
			Détermination de la teneur en impuretés matériaux recyclés LC 21-260 (%) 101
			Teneur en particules ≤ 5 µm NQ 2501-025 (%) 0,0
			Coefficient d'écoulement LC 21-075 (%) 101
			Proctor modifié NQ 2501-255 (kg/m³) 101
			(W%) 101
			Méthode AASHTO
(*) = Un astérisque indique le ou les résultats non conformes			
Remarques : Les résultats sont représentatifs de l'échantillon fourni par le client. La granulométrie a été fournie par le client, celle-ci représente la moyenne en production pour l'année 2018 Exigences selon le tableau 12 de la norme CSA A23.1			
Vérifié par : Valérie Fauteux  Approuvé par : Marie-Hélène Lalande-Héroux  Date : 2019-04-23			
N°Réf. : LG017 (R05 20-10-10)			

Figure A V.1 Sable manufacturé (0-2,5 mm)

		ESSAIS SUR MATÉRIAUX GRANULAIRES FINS		N/D : LC-19-0305-00
20, rue Émilien-Marcoux, bur. 110, Blainville, QC, J7C 0B5				V/D : -
CLIENT Sables L.G. (Division de Bauval inc.) PROJET Contrôle qualitatif des matériaux - Essais en laboratoire - Année 2019		N° client: BAUVAL102		
TYPE DE MATÉRIAU Pierre concassée granitique CALIBRE 2,5-5 mm USAGE Divers ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ÉCHANTILLONNÉ PAR Client		FOURNISSEUR Bauval CMM/Sables L.G. PROVENANCE St-Hippolyte N° DE RÉF. CLIENT Bon de commande : 8124 N° DE LAB. 157138		
DATE 2019-02-08				
GRANULOMÉTRIE			ESSAIS DIVERS	
CSA A23.2-2A et 5A / LC 21-040				
Tamais (mm)	% Passant	Exigences		
112			Micro-Deval <u>CSA A23.2-23A</u> (%)	Friabilité <u>LC 21-080</u> (Exigence ≤ 40) (%) 20,1
80			Densité brute (état sec) <u>CSA A23.2-6A</u>	Micro-Deval <u>LC 21-101</u> (Exigence ≤ 30) (%) 7,8
56			Densité brute (état SSS) <u>CSA A23.2-6A</u>	Teneur en eau <u>LC 21-200</u> (%)
40			Densité brute (apparente) <u>CSA A23.2-6A</u>	Densité brute (état sec) <u>LC 21-065</u> <u>LC 21-066</u> 2,710 <u>Combiné</u>
31,5			Absorption <u>CSA A23.2-6A</u> (%)	Densité brute (état SSS) <u>LC 21-065</u> <u>LC 21-066</u> 2,723 <u>Combiné</u>
20			Masse volumique <u>CSA A23.2-10A</u> tassée (kg/m ³) 1491 non-tassée (kg/m ³) 1332 pourcentage de vides	Densité brute (apparente) <u>LC 21-065</u> <u>LC 21-066</u> 2,750 <u>Combiné</u>
14			Mottes d'argile et particules friables <u>CSA A23.2-3A</u> (%) 0,1	Absorption (%) <u>LC 21-065</u> <u>LC 21-066</u> 0,54 <u>Combiné</u>
10	100		Teneur en particules légères <u>CSA A23.2-4A</u> (%)	Masse volumique <u>LC 21-060</u> tassée (kg/m ³) non-tassée (kg/m ³) pourcentage de vides
5	89		Indice colorimétrique <u>CSA A23.2-7A</u> Couleur comparative	Bleu de méthylène <u>LC 21-255</u> (%)
2,5	20		Propreté (80µm) <u>CSA A23.2-5A</u> (%) 0,2	Matières Organiques <u>LC 31-228</u> (%)
1,25	7		Réaction alcalis granulat <u>CSA A23.2-14A</u> 1 an (%)	Détermination de la teneur <u>LC 21-260</u> en impuretés matériaux recyclés (%)
0,630	3		Réaction alcalis granulat <u>CSA A23.2-25A</u> Expansion accélérée (%)	Teneur en particules ≤ 5 µm <u>NQ 2501-025</u> (%)
0,315	2		Durabilité (MgSO4) <u>CSA A23.2-9A</u> perte > 5mm (%) perte < 5mm (%) perte combinée (%)	Coefficient d'écoulement <u>LC 21-075</u>
0,160	1		Module de finesse <u>CSA A23.1-04</u>	Proctor modifié <u>NQ 2501-255</u> (kg/m ³) (W%) Méthode AASHTO
0,080	0,9		Équivalent de sable <u>ASTM D2419</u>	
			Essai de perméabilité <u>ASTM D2434</u> (cm/sec) > 1	
(*) = Un astérisque indique le ou les résultats non-conformes				
Remarques : Les résultats sont représentatifs de l'échantillon fourni par le client. La granulométrie a été fournie par le client, celle-ci représente la moyenne en production. Exigences selon le tableau 12 de la norme CSA A23.1				
Vérifié par : Valérie Fauteux <i>Valérie Fauteux</i> Approuvé par : Marie-Hélène Lalande-Héroux <i>MLH</i> Date : 2019-04-19				
N/Réf. : LG017 (R05 20-10-10)				

Figure A V.3 Pierre concassé granitique (2,5-5 mm)

 ESSAIS SUR MATÉRIAUX GRANULAIRES		N/D : LC-19-0305-00 V/D : -	
20, rue Émilien-Marcoux, bur. 110, Blainville, QC, J7C 0B5			
CLIENT Sables L.G. (Division de Bauval inc.)		N° client: BAUVAL102	
PROJET Contrôle qualitatif des matériaux - Essais en laboratoire - Année 2019			
TYPE DE MATÉRIAU Pierre concassée granitique		FOURNISSEUR Bauval CMM/Sables L.G.	
CALIBRE 5-10 mm		PROVENANCE St-Hippolyte	
USAGE Enrobé bitumineux et béton de ciment		N° DE RÉF. CLIENT Bon de commande : 8124	
ÉPAISSEUR DE LA COUCHE		NO. DE LAB. 157139	
ÉCHANTILLONNÉ PAR Client		DATE 2019-02-08	
GRANULOMÉTRIE		ESSAIS DIVERS	
CSA A23.2-2A et 5A / LC 21-040		Los Angeles <u>CSA A23.2-16A</u>	
Tamis (mm)	% Passant	grade D	Los Angeles <u>LC 21-400</u>
		(Exigence ≤ 50) (%)	grade C1
		18,9	(Exigence ≤ 35) (%)
			24,2
		Micro-Deval <u>CSA A23.2-29A</u>	Micro-Deval <u>LC 21-070</u>
		(Exigence ≤ 17) (%)	grade E
		5,9	(Exigence ≤ 15) (%)
			6,5
		Micro-Deval + Los Angeles (%)	
		Densité brute (état sec) <u>CSA A23.2-12A</u>	Micro-Deval + Los Angeles
		2,716	(Exigence ≤ 40) (%)
			30,7
		Densité brute (état SSS) <u>CSA A23.2-12A</u>	
		2,731	
		Densité brute (apparente) <u>CSA A23.2-12A</u>	Densité brute (état sec) <u>LC 21-067</u>
		2,757	2,719
		Absorption <u>CSA A23.2-12A</u>	Densité brute (état SSS) <u>LC 21-067</u>
		(%)	2,732
		0,55	Densité brute (apparente) <u>LC 21-067</u>
			2,757
		Particules plates <u>CSA A23.2-13A</u>	Absorption <u>LC 21-067</u>
		(Exigence ≤ 25) (%)	(%)
		8,8	0,51
		Particules allongées <u>CSA A23.2-13A</u>	Particules plates <u>LC 21-265</u>
		(Exigence ≤ 40) (%)	(%)
		37,7	
		Particules plates et allongées <u>CSA A23.2-13A</u>	Particules allongées <u>LC 21-265</u>
		(Exigence ≤ 20) (%)	(%)
		2,2	
		Masse volumique <u>CSA A23.2-10A</u>	Masse volumique <u>LC 21-060</u>
		tassée (kg/m³)	tassée (kg/m³)
		1482	non-tassée (kg/m³)
		non-tassée (kg/m³)	pourcentage de vides
		1309	
		pourcentage de vides	
		Motte d'argiles et particules friables <u>CSA A23.2-3A</u>	Fragmentation <u>LC 21-100</u>
		(Exigence ≤ 0,3) (%)	(%)
		0,2	100
		Teneur en particules légères <u>CSA A23.2-4A</u>	Bleu de méthylène <u>LC 21-255</u>
		(Exigence ≤ 0,5) (%)	(%)
		0,0	
		Résistance au gel/dégel des granulats non-confinés <u>CSA A23.2-24A</u>	Matières Organiques <u>LC 31-228</u>
		(Exigence ≤ 6) (%)	(%)
		1,2	
		Propreté (80µm) <u>CSA A23.2-5A</u>	Détermination de la teneur en impuretés matériaux recyclés <u>LC-21-260</u>
		(%)	(%)
		0,8	
		Réaction alcalis granulat 1 an <u>CSA A23.2-14A</u>	Teneur en particules inférieures à 5 µm <u>NQ 2501-025</u>
		(%)	(%)
		Réaction alcalis granulat Expansion accélérée <u>CSA A23.2-25A</u>	Détermination composition matériau recyclé <u>LC 21-901</u>
		(%)	
		Durabilité (MgSO4) <u>CSA A23.2-9A</u>	Proctor modifié <u>NQ 2501-255</u>
		perte > 5mm (%)	(kg/m³)
		0,4	(W%)
		perte < 5mm (%)	Méthode
		perte combinée (%)	AASHTO
			Résistance au polissage des granulats : <u>LC 21-102</u>
(*) = Un astérisque indique le ou les résultats non-conformes			
Remarques : Les résultats sont représentatifs de l'échantillon fourni par le client. La granulométrie a été fournie par le client, celle-ci représente la moyenne en production. Exigences selon le tableau 12 de la norme CSA A23.1 pour un gros granulat (usage béton soumis au gel-dégel). Gros granulat de catégorie 1a selon la norme BNQ 2560-114 (pour usage enrobé bitumineux)			
Vérifié par : Valérie Fauteux		Approuvé par : Marie-Hélène Lalande-Héroux	
N/Réf. : LG018 (R04 20-10-10)		Date : 2019-04-24	

Figure A V.4 Pierres concassées granitiques (5-10 mm)



Client:	BAUVAL CMM
Projet:	Essais de laboratoire Usine St-Laurent - Année 2019
Fournisseur:	Bauval CMM
Usine:	Hj Tech (085)

Type de mélange:	Asphalte recyclé
Type de bitume:	
Formule:	085-19GBR
Facteur de correction:	(ext.) 0,00 (lon.) 0,00

Date	Localisation / tonnage	28 mm.	20 mm.	14 mm.	10 mm.	5 mm	2,5 mm.	1,25 mm.	0,630 mm.	0,315 mm.	0,160 mm.	0,080 mm.	TG	SST	% Bit.	FBE	PBA	VCB	Stab.	Def.	Brute	Max	%Vide
16/05/2019	GR19-008	100	100	100	99	80,0	61	48	37	25	15	8,7	574	9,32	5,01							2,524	
16/05/2019	GR19-009	100	100	100	99	79,5	63	50	39	26	15	8,8	560	9,32	5,14							2,518	
16/05/2019	GR19-010	100	100	100	99	79,5	63	50	39	26	15	9,1	560	9,61	5,05							2,519	
16/05/2019	GR19-011	100	100	100	99	78,7	62	49	38	26	14	8,5	575	9,24	5,03							2,522	
25/05/2019	GR19-012	100	100	100	99	80,9	64	51	40	26	15	9,4	565	9,77	4,97							2,533	
04/06/2019	GR19-013	100	100	100	98	72,0	55	43	34	24	14	8,3	548	8,75	4,89							2,506	
07/06/2019	GR19-026	100	100	100	98	76,5	58	46	36	25	15	9,3	564	9,41	4,89							2,532	
17/06/2019	GR19-041	100	100	100	98	79,4	61	47	37	25	15	9,3	572	9,50	5,12							2,505	
19/06/2019	GR19-063	100	100	100	100	87,2	74	61	49	34	20	10,7	636	11,83	5,41							2,504	
17/07/2019	GR19-063	100	100	100	100	83,1	67	54	43	30	18	9,8	605	10,69	5,17							2,509	
22/07/2019	GR19-072	100	100	100	100	83,1	67	54	43	30	17	9,9	600	10,59	5,01							2,521	
31/07/2019	GR19-079	100	100	100	98	81,3	67	54	43	30	17	9,8	568	9,85	4,73							2,524	
07/08/2019	GR19-089	100	100	100	98	73,9	59	48	38	27	16	9,8	568	9,85	4,73							2,521	
13/08/2019	GR19-099	100	100	100	98	76,9	59	47	37	26	16	9,8	570	9,75	4,81							2,521	
17/08/2019	GR19-109	100	100	100	100	83,9	68	54	39	26	17	9,3	610	10,68	5,43							2,506	
28/08/2019	GR19-114	100	100	100	97	72,3	60	48	38	27	16	9,1	573	10,03	5,17							2,522	
02/09/2019	GR19-121	100	100	100	99	76,8	60	48	38	27	16	9,1	573	10,03	5,17							2,522	
12/09/2019	GR19-129	100	100	100	97	78,0	62	50	43	30	17	9,2	575	9,82	4,90							2,530	
17/09/2019	GR19-134	100	100	100	98	80,4	65	53	42	28	16	9,5	592	10,15	5,11							2,533	
19/09/2019	GR19-138	100	100	100	98	75,7	59	47	37	25	15	8,3	565	9,14	4,95							2,520	
07/10/2019	GR19-151	100	100	100	97	79,7	66	54	43	29	17	9,5	595	10,38	4,91							2,525	
29/10/2019	GR19-162	100	100	100	99	82,4	66	53	42	29	17	10,1	599	10,54	5,05							2,525	
30/10/2019	GR19-168	100	100	100	96	73,7	57	45	36	25	16	9,2	558	9,47	4,32							2,547	
06/11/2019	GR19-187	100	100	100	98	78,4	62	50	39	27	16	9,3	580	9,85	4,63							2,530	
06/11/2019	GR19-188	100	100	100	98	84,4	70	56	44	30	18	10,1	611	10,88	4,89							2,532	
																				</			

Préparé par : Franco Filippelli, tech.

Vérfifié par : Franco Filippelli, tech.

Date : 12/11/2019

Figure A V.5 Granulats bitumineux récupérés (GBR 0-10 mm)

ANNEXE VI

FEUILLES DE FORMULES D'ENROBÉ DES VOLETS 2 ET 3

ESG-10 R30 (TR-1)																						
Granulats utilisés			Granulométrie										Proportion (%)			Densité des granulats		Absorption en eau des granulats (%)				
Calibre / Classe granulaine	Identification (ID) : Absa (AB), Bedou (BP), Cilam (C), Colmar (CL), Gascogne (GS), Gironde (GR), Lorraine (LO), Manufacture (SM), Filler (F)		Tamis en mm (% passant)										Tamis en µm (% passant)				Ciblée	Réelle	Brute	Apparente		
	(ID)	Provenance	28	20	14	10	5	2,5	1,25	630	315	160	80									
5 - 10 mm	P	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	100	92	11	3	2	2	2	2	1,4	39	39	2,767	2,804	0,48				
2,5 - 5 mm	P	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0,8	24	24	2,732	2,761	0,39				
2,5 - 5 mm	SM	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1,6	5	5	2,734	2,761	0,36				
0 - 5 mm	P	Sables L.-G. St-Hippolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1,9	0	0	2,718	2,750	0,44				
GBR 0-10	GBR	CMH, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8,6	30	30	2,714	2,714	0				
Filler	F	Filler de fractionation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2,700	2,775	1				
Granulométrie du combiné			100	100	100	97	56,9	31	23	18	13	8	5,4	100	100	2,740	2,762	0,30				

Formule et exigences																										
Formule		Tamis en mm (% passant)										Tamis en µm (% passant)				Blutume TOTAL (%)	Blutume gradat (%)	Vide Nomin (%)	VCB (%)	Densité		Blutume anhydrique (%)				
28	20	14	10	5,00	2,5"	1,25"	630"	315"	160	80	3	5,64	4,12	7,9	20,0	65,7	Brute	Maximale								
Spéc.	Max	-	100	100	100	97	56,9	31	23	18	13	8	5,4	5,64	4,12	7,9	20,0	65,7	2,325	2,522	0,36					
Min	-	100	100	100	92	52	46,1	30,7	22,8	18,1	-	3	5,64	4,12	7,9	20,0	65,7	2,325	2,522	0,36						
- Zone de restriction																										
Caractéristiques de la formule															PGG								ITSM			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)															N_{gradation}								Température (°C)		Module, E (MPa)	
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)															Vides (%)								-20,0		28576	
Densité du bitume d'ajout, D_a															Spéc. (%)								-10,0		19959	
Densité effective des granulats, D_{pe}															N_{gradation}								0,0		11255	
Pourcentage de bitume effectif, P_{be} (%)															Vides (%)								10,0		4436	
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)															Spéc. (%)											
Total granulométrique, TG (%)															N_{gradation}											
Rapport du bitume total granul.															N_{gradation}											
Film de bitume effectif, FBE (µm)															N_{gradation}											
Surface spécifique, SS (m²/kg)															N_{gradation}											
Rapport Passant 80µm/bitume															N_{gradation}											

ESG-10 R30 (TR-2)																						
Granulats utilisés				Granulométrie												Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption des granulats (%)		
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Absais (AB), Bordenau (BPF), Colature (C), Ciblure lavé (CL), Recyclé (GBR), Parre (P), Sorte (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F)	Provenance		Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)						Réelle		Brute	Apparente	
		(ID)		28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée							
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	92	11	3	2	2	2	2	1.4	39	39	2.767	2.804	0.48				
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	24	2.732	2.761	0.39				
2,5 - 5 mm	SM	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	5	2.734	2.761	0.36				
0 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44				
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0				
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1				
Granulométrie du combiné			100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	2.740	2.762	0.30				

Formule et exigences																			
Formule		Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160					80	Brute		Maximale
Spéc.	Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	* Zone de restriction						
	Min	-	100	100	92	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8							0.24

Caractéristiques de la formule		
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34	
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34	
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016	
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.757	
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.42	
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.41	
Total granulométrique, TG (%)	451	
Rapport du bitume/total granul.	1.25	
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.59	
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32	
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96	

PCG		
N _{gratons}	Vides (%)	Spéc. (%)
10	15.1	≥ 11.0
80	6.2	4.0 - 7.0
200	3.4	≤ 2.0
Resseuage	Non	---

ITSM	
Température (°C)	Module, E (MPa)
-20.0	29887
-10.0	20655
0.0	11586
10.0	4528

Figure A VI.2 Feuille de formule ESG-10 malaxeur thermorégulé (TR-2) temps de malaxage 2

ESG-10 R30 (TR-3)																				
Granulats utilisés				Granulométrie																
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Abrasif (AB), Bardoau (BDF), Craieure (C), Craieure lavé (CL), Recyclé (GBR), Pierre (P), Sable (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).			Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)								
	(ID)	Provenance		28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Proportion (%)				Densité des granulats	
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte		100	100	100	92	11	3	2	2	2	2	1.4	39	39	2.767	2.804	0.48	
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte		100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	24	2.732	2.761	0.39	
2,5 - 5 mm	SM	Sables L-G, St-Hippolyte		100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	5	2.734	2.761	0.36	
0 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte		100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44	
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal		100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0	
Filler	F	Filler de fracturation usiné		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1	
		Granulométrie du combiné		100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	2.740	2.762	0.30	

Formule et exigences																	
Formule				Tamis en mm (% passant)													
				28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630*	315*	160	80			
				100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4		
Spéc.	Max	-	100	100	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	* Zone de restriction		
	Min	-	100	100	100	100	92	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8			

Caractéristiques de la formule									
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)				52S-34					
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)				52S-34					
Densité du bitume d'ajout, D _b				1.016					
Densité effective des granulats, D _{ge}				2.764					
Pourcentage de bitume effectif, P _{we} (%)				5.34					
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)				13.25					
Total granulométrique, TG (%)				451					
Rapport du bitume/total granul.				1.25					
Film de bitume effectif, FBE (µm)				10.44					
Surface spécifique, SS (m2/kg)				5.32					
Rapport Passant 80µm/bitume				0.95					

Formule et exigences														
Formule				Tamis en µm (% passant)										
				28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80
				100	100	100	100	92	11	3	2	2	1.4	39
Spéc.	Max	-	100	100	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3
	Min	-	100	100	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8

Formule et exigences													
Formule				Tamis en µm (% passant)									
				28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160
				100	100	100	100	92	11	3	2	2	1.4

ESG-10 R30 (TR-4)																					
Granulats utilisés				Granulométrie										Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption des granulats (%)			
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Absair (AB), Bandeau (BPF), Calibre (C), Ciblage lavé (CL), Recyclé (GBR), Pierre (P), Soutie (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).			Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)				Ciblée	Réelle	Brute	Apparente		
	(ID)	Provenance		28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80							
5 - 10 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	92	11	3	2	2	2	2	1.4	39	39	2.767	2.804	0.48		
2,5 - 5 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	24	2.732	2.761	0.39		
2,5 - 5 mm	SM		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	5	2.734	2.761	0.36		
0 - 5 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44		
GBR 0-10	GBR		CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0		
Filler	F		Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1		
Granulométrie du combiné				100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	2.740	2.762	0.30		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Zone de restriction	
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160		80
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8		5.4
Spéc.	Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3
	Min	-	100	100	92	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8

Caractéristiques de la formule									
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)									
52S-34									
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)									
52S-34									
Densité du bitume d'ajout, D _b									
1.016									
Densité effective des granulats, D _{gr}									
2.767									
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)									
5.29									
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)									
13.13									
Total granulométrique, TG (%)									
451									
Rapport du bitume/total granul.									
1.25									
Film de bitume effectif, FBE (µm)									
10.33									
Surface spécifique, SS (m2/kg)									
5.32									
Rapport Passant 80µm/bitume									
0.96									

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Zone de restriction	
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160		80
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8		5.4
Spéc.	Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3
	Min	-	100	100	92	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8

Caractéristiques de la formule									
Classe de performance de l'additif, P _{add} (%)									
30									
Pourcentage de bitume de l'additif, P _{add} (%)									
5.06									
Pourcentage mobilisable, P _{mob} (%)									
100									
Pourcentage de bitume dans l'EB, P _{ak} (%)									
1.52									
Entente D _{min}									
2.533									
Ratio de Bitume Recyclé, RBR (%)									
30.2									

PCG				ITSM			
N _{gratons}	Vides (%)	Spéc. (%)		Température (°C)	Module, E (MPa)		
10	15.1	≥ 11.0		-20.0	32264		
80	6.2	4.0 - 7.0		-10.0	23492		
200	3.4	≤ 2.0		0.0	12211		
Resassage	Non	---		10.0	5356		

ESG-10 R30 (HB-1)																							
Granulats utilisés				Granulométrie																Absorption des granulats (%)			
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Abrasif (AB), Bardoau (BPF), Célature (C), Cibière lavé (CL), Recyclé (GBR), Parre (P), Sorte (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).	Provenance		Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)								Proportion (%)		Densité des granulats	
		(ID)		28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Brute	Apparente					
5 - 10 mm	P			100	100	100	92	11	3	2	2	2	1.4	39	39	2.767	2.804	0.48					
2,5 - 5 mm	P			100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	24	2.732	2.761	0.39				
2,5 - 5 mm	SM			100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	5	2.734	2.761	0.36				
0 - 5 mm	P			100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44				
GBR 0-10	GBR			100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0				
Filler	F			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1				
Granulométrie du combiné				100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	2.740	2.762	0.30				

Formule et exigences																				
Formule		Tamis en mm (% passant)				Tamis en µm (% passant)				Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)			
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"						315"	160		80	Brute	Maximale
Spéc.	Max	-	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.65	4.13	5.7	72.4	2.381	2.526	0.44
	Min	-	100	100	92	52	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3								
* Zone de restriction																				

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.773		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.23		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.00		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.25		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.21		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Granulat recyclé			
Pourcentage de l'additif, P _{ast} (%)	30		
Pourcentage de bitume de l'additif, P _{adest} (%)	5.06		
Pourcentage mobilisable, P _{mob} (%)	100		
Pourcentage de bitume dans l'EB, P _{be} (%)	1.52		
Entente D _{mm}	2.533		
Ratio de Bitume Recyclé, RBR (%)	30.2		

PCG			
N _{gratons}	Vides (%)	Spéc. (%)	
10	14.4	≥ 11.0	
80	5.7	4.0 - 7.0	
200	2.9	≤ 2.0	
Resseuage	Non	---	

ITSM			
Température (°C)	Module, E (MPa)		
-20.0	29765		
-10.0	20489		
0.0	10630		
10.0	4030		

Figure A VI.5 Feuille de formule ESG-10 malaxeur de comptoir (HB-1) temps de malaxage 1

ESG-10 R30 (HB-2)																			
Granulats utilisés				Granulométrie										Proportion (%)			Densité des granulats		Absorption en eau des granulats (%)
Calibre / Classe granulaire	(ID)	Provenance		Tamis en mm (% passant)										Tamis en µm (% passant)			Brute		Apparente
		28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80		80					
5 - 10 mm	P	100	100	100	92	11	3	2	2	2	2	1.4	39	2	2	2	2.767	2.804	0.48
2,5 - 5 mm	P	100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	2	2	2	2.732	2.761	0.39
2,5 - 5 mm	SM	100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	5	5	5	2.734	2.761	0.36
0 - 5 mm	P	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	0	0	2.718	2.750	0.44
GBR 0-10	GBR	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	2	2	2	2.714	2.714	0
Filler	F	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2	2	2.700	2.775	1
Granulométrie du combiné		100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	100	100	2.740	2.762	0.30

Formule et exigences													
Formule		Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	
		28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	Bitume d'ajout (%)	
		100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.62
Max		-	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	* Zone de restriction	
Min		-	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8		

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _a	1.016		
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.771		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.22		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.97		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.19		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Granulat recyclé			
Pourcentage de l'additif, P _{ast} (%)	30		
Pourcentage de bitume de l'additif, P _{adast} (%)	5.06		
Pourcentage mobilisable, P _{mob} (%)	100		
Pourcentage de bitume dans l'EB, P _{be} (%)	1.52		
Entente D _{mm}	2.533		
Ratio de Bitume Recyclé, RBR (%)	30.2		

PCG			
N _{gratons}	Vides (%)	Spéc. (%)	
10	13.5	≥ 11.0	
80	4.5	4.0 - 7.0	
200	1.7	≤ 2.0	
Resseau	Non	---	

ITSM			
Température (°C)	Module, E (MPa)		
-20.0	31221		
-10.0	22444		
0.0	11419		
10.0	4122		

Figure A VI.6 Feuille de formule ESG-10 malaxeur de comptoir (HB-2) temps de malaxage 2

ESG-10 R30 (HB-3)																			
Granulats utilisés				Granulométrie															
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Absair (AB), Bordenau (BPF), Ciblure (C), Ciblure lavé (CL), Recyclé (GBR), Parre (P), Sorte (BC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).		Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)								
	(ID)	Provenance	28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Brute	Apparente	Densité des granulats	
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	92	11	3	2	2	2	2	1.4	39	39	2.767	2.804	0.48	
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	24	2.732	2.761	0.39	
2,5 - 5 mm	SM	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	5	2.734	2.761	0.36	
0 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44	
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0	
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1	
Granulométrie du combiné			100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	2.740	2.762	0.30	

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Spéc.	Min	-	100	100	92	52	46.1	30.7	22.8	18.1	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	

• Zone de restriction

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.760		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.34		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.24		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.43		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)					
	28	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1						

ESG-10 R30 (HB-4)																				
Granulats utilisés			Granulométrie																	
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Absais (AB), Bardoau (BPF), Cblature (C), Cblature lavé (CL), Recyclé (GBR), Parre (P), Sorte (BC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).	Provenance	Tamis en mm (% passant)									Tamis en µm (% passant)								
			(ID)	28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Brute	Apparente	Densité des granulats	
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	92	11	3	2	2	2	2	1.4	39	39	2.767	2.804	0.48	
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	24	2.732	2.761	0.39	
2,5 - 5 mm	SM	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	5	2.734	2.761	0.36	
0 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44	
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal	100	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0	
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1	
Granulométrie du combiné			100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	2.740	2.762	0.30	

Formule et exigences																				
Formule		Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
Spéc.	Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	* Zone de restriction							0.22
	Min	-	100	100	92	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8								

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.756		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.39		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.24		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.56		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Formule et exigences																				
Formule	Spéc.	Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160						80	Brute		Maximale
		100	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.62	4.10	3.4	16.3	82.0	2.429	2.514	0.22

Caractéristiques de la formule			

ESG-10 R30 (PM-1)																							
Granulats utilisés				Granulométrie																			
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Absail (AB), Bordenau (BPF), Colature (C), Ciblage lavé (CL), Recyclé (GBR), Parre (P), Sorte (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F)	Provenance		Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)							Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption en eau des granulats (%)
		(ID)		28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Brute	Apparente					
5 - 10 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	92	11	3	2	2	2	2	1.4	39	39	2.767	2.804	0.48				
2,5 - 5 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	24	2.732	2.761	0.39				
2,5 - 5 mm	SM		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	5	2.734	2.761	0.36				
0 - 5 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44				
GBR 0-10	GBR		CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0				
Filler	F		Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1				
Granulométrie du combiné				100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	2.740	2.762	0.30				

Formule et exigences													
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)				
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80		
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4	
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3		
Min	-	100	100	92	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8		
Spéc.	* Zone de restriction												

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences												
Formule	Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)			
	28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"	160	80	
	100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.4
Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	
Min	-	100	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8	
Spéc.	* Zone de restriction											

Caractéristiques de la formule					
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34				
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016				
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.778				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.17				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.86				
Total granulométrique, TG (%)	451				
Rapport du bitume/total granul.	1.25				
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.09				
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32				
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96				

Formule et exigences					
Formule					

ESG-10 R30 (PM-2)																				
Granulats utilisés				Granulométrie												Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption des granulats (%)
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Abrasif (AB), Bardoau (BPF), Colature (C), Colature lavé (CL), Recyclé (GBR), Pierre (P), Sable (BC), Sable manufacturé (SM), Filler (F)	Provenance		Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)				Brute		Apparente		
		(ID)		28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle				
5 - 10 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	92	11	3	2	2	2	1.4	39	39	2.767	2.804	0.48		
2,5 - 5 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	2.732	2.761	0.39		
2,5 - 5 mm	SM		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	2.734	2.761	0.36		
0 - 5 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44	
GBR 0-10	GBR		CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0	
Filler	F		Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1	
Granulométrie du combiné				100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	2.740	2.762	0.30	

Formule et exigences																		
Formule		Tamis en mm (% passant)				Tamis en µm (% passant)				Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	5.00	2.5"	1.25"	630"	315"						160	80		Brute
Spéc.	Max	-	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	* Zone de restriction						0.42
	Min	-	100	100	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8							

Caractéristiques de la formule		
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34	
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34	
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016	
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.771	
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.25	
Volume de bitume effectif à 0% de vide, VBE (%)	13.04	
Total granulométrique, TG (%)	451	
Rapport du bitume/total granul.	1.25	
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.24	
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32	
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96	

PCG		
N _{gratons}	Vides (%)	Spéc. (%)
10	15.6	≥ 11.0
80	6.8	4.0 - 7.0
200	3.9	≤ 2.0
Resseuage	Non	---

ITSM		
Température (°C)	Module, E (MPa)	
-20.0	31883	
-10.0	20421	
0.0	11180	
10.0	4374	

Figure A VI.10 Feuille de formule ESG-10 malaxeur Pug Mill (PM-2) temps de malaxage 2

ESG-10 R30 (PM-3)																							
Granulats utilisés				Granulométrie																			
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Absair (AB), Bordenau (BPF), Ciblure (C), Ciblure lavé (CL), Recyclé (GBR), Parre (P), Sorte (BC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).		Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)								Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption des granulats (%)
	(ID)	Provenance	28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Brute	Apparente						
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	92	11	3	2	2	2	2	1.4	39	39	2.767	2.804	0.48					
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	24	2.732	2.761	0.39					
2,5 - 5 mm	SM	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	5	2.734	2.761	0.36					
0 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44					
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0					
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1					
Granulométrie du combiné			100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	2.740	2.762	0.30					

Formule et exigences																	
Formule		Tamis en mm (% passant)				Tamis en µm (% passant)				Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630"					315"	160		80
Spéc.	Max	-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	* Zone de restriction				0.35
	Min	-	100	100	92	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8					

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.766		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.31		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.17		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.25		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.37		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Granulat recyclé			
Pourcentage de l'additif, P _{ast} (%)	30		
Pourcentage de bitume de l'additif, P _{adast} (%)	5.06		
Pourcentage mobilisable, P _{mob} (%)	100		
Pourcentage de bitume dans l'EB, P _{be} (%)	1.52		
Entente D _{mm}	2.533		
Ratio de Bitume Recyclé, RBR (%)	30.2		

PCG			
N _{gratons}	Vides (%)	Spéc. (%)	
10	15.5	≥ 11.0	
80	6.8	4.0 - 7.0	
200	3.9	≤ 2.0	
Resseuage	Non	---	

ITSM			
Température (°C)	Module, E (MPa)		
-20.0	32000		
-10.0	21004		
0.0	11139		
10.0	4215		

Figure A VI.11 Feuille de formule ESG-10 malaxeur Pug Mill (PM-3) temps de malaxage 3

ESG-10 R30 (PM-4)																				
Granulats utilisés				Granulométrie										Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption des granulats (%)		
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Absaif (AB), Bordenau (BPF), Colature (C), Ciblure lavé (CL), Recyclé (GBR), Pare (P), Sorte (BC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).	Provenance		Tamis en mm (% passant)								Tamis en µm (% passant)				Ciblée	Réelle	Brute	Apparente	
		(ID)		28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80						
5 - 10 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	92	11	3	2	2	2	2	1.4	39	39	2.767	2.804	0.48	
2,5 - 5 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	90	19	6	3	2	1	0.8	24	24	2.732	2.761	0.39	
2,5 - 5 mm	SM		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	85	57	38	22	10	1.6	5	5	2.734	2.761	0.36	
0 - 5 mm	P		Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44	
GBR 0-10	GBR		CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0	
Filler	F		Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1	
Granulométrie du combiné				100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	100	100	2.740	2.762	0.30	

Formule et exigences																			
Formule		Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5"	1.25"	630*							80			
									315*	160	80								
		100	100	100	97	56.9	31	23	18	13	8	5.4	5.65	4.13	5.3	74.5	2.383	2.515	0.25
Max		-	100	100	100	65	46.1	36.7	26.8	18.1	-	3	* Zone de restriction						
Spéc.	Min	-	100	100	92	52	46.1	30.7	22.8	18.1	-	8							

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.016		
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.759		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	5.41		
Volumé de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	13.38		
Total granulométrique, TG (%)	451		
Rapport du bitume/total granul.	1.25		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	10.55		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	5.32		
Rapport Passant 80µm/bitume	0.96		

Granulat recyclé		
Pourcentage de l'additif, P _{ast} (%)	30	
Pourcentage de bitume de l'additif, P _{adest} (%)	5.06	
Pourcentage mobilisable, P _{mob} (%)	100	
Pourcentage de bitume dans l'EB, P _{be} (%)	1.52	
Entente D _{mm}	2.533	
Ratio de Bitume Recyclé, RBR (%)	30.2	

PCG		
N _{gratons}	Vides (%)	Spéc. (%)
10	14.1	≥ 11.0
80	5.3	4.0 - 7.0
200	2.5	≤ 2.0
Resseuage	Non	---

ITSM		
Température (°C)	Module, E (MPa)	
-20.0	33000	
-10.0	22830	
0.0	11846	
10.0	4539	

Figure A VI.12 Feuille de formule ESG-10 malaxeur Pug Mill (PM-4) temps de malaxage 4

MUN-10 R0																							
Granulats utilisés				Granulométrie												Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption en eau des granulats (%)			
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Abrasif (AB), Boudoir (BB), Cribum (C), Cillure lavé (CL), Recyclé (GBR), Pierre (P), Scaie (SO), Sable manufacturé (SM), Filler (F).			Tamis en mm (% passant)										Tamis en µm (% passant)							Brute	Apparente	
	(ID)	Provenance		28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle							
5 - 10 mm	P	Sables L.-G. St-Hippolyte		100	100	100	93	11	4	3	3	2	2	1.5	21.5	21.5	2721	2756	0.47				
2.5 - 5 mm	P	Sables L.-G. St-Hippolyte		100	100	100	100	83	18	5	2	1	1	0.3	0	0	2721	2762	0.54				
2.5 - 5 mm	SM	Sables L.-G. St-Hippolyte		100	100	100	100	100	83	55	37	25	13	5.8	62	62	2723	2745	0.29				
0 - 5 mm	C	Sables L.-G. St-Hippolyte		100	100	100	100	100	64	45	33	24	17	10.7	13.2	13.2	2718	2750	0.43				
0 - 5 mm	P	Sables L.-G. St-Hippolyte		100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2718	2750	0.44				
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal		100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	0	0	2714	2714	0				
Filler	F	Filler de fracturation usine		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	3.3	3.3	2700	2775	1				
Granulométrie du combiné				100	100	100	98	80.9	64	44	31	22	14	8.6	100	100	2721	2749	0.37				

Formule et exigences										
Formule	Tamis en mm (% passant)									
	28	20	14	10	5.00	2.5	1.25	630	315	160
	100	100	100	98	80.9	64	44	31	22	14
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Formule et exigences										
Formule	Tamis en µm (% passant)									
	80	160	315	630	125	250	500	1000	2000	4000
	17.2	65.1	65.1	17.2	6.8	6.8	4.97	4.97	6.8	17.2
Spéc.	Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min	-	-	-	-					

MUN-10 R15 (FM)																					
Granulats utilisés				Granulométrie												Absorption en eau des granulats (%)					
Calibre / Classe granulatoire	Identification (ID) : Acroar (AB), Bureau (BP), Orblum (C), Chaux (A) ou (C) selon le fabricant (SM, Filler (F))			Tamis en mm (% passant)												Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption en eau des granulats (%)	
	(ID)	Provenance			28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Brute	Apparente		
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte			100	100	100	93	11	4	3	3	2	2	1.5	13	13	2.721	2.756	0.47	
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte			100	100	100	100	83	18	5	2	1	1	1	0.3	0	2.721	2.762	0.54	
2,5 - 5 mm	SM	Sables L-G, St-Hippolyte			100	100	100	100	100	83	55	37	25	13	5.8	49	49	2.723	2.745	0.29	
0 - 5 mm	C	Sables L-G, St-Hippolyte			100	100	100	100	64	45	33	24	17	10.7	21	21	2.718	2.750	0.43		
0 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte			100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44	
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal			100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	15	15	2.714	2.714	0	
Filler	F	Filler de fracturation usiné			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1	
Granulométrie du combiné					100	100	100	99	85.4	66	47	34	24	14	8.6	100	100	2.720	2.743	0.31	

Formule et exigences																				
Formule		Tamis en mm (% passant)										Bilume TOTAL (%)	Bilume disjoint (%)	Vide Nédesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bilume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5	1.25	630	315	160						80			
		100	100	100	99	85.4	66	47	34	24	14						8.6			
Max		-	100	100	95	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Spéc.		Min	100	100	100	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.020		
Densité effective des granulats, D _{gr}	2.755		
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)	4.572		
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	11.37		
Total granulométrique, TG (%)	578		
Rapport du bitume/total granul.	0.87		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	5.20		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	9.08		
Rapport Passant 80µm/bitume	1.71		

PCG			
N _{gr} ations	Vides (%)	Spéc. (%)	Angle de phase, φ (°)
10	13.1	± 11.0	
80	7.3	4.0 - 7.0	
200	5.5	± 2.0	
Resuage	Non	---	19.7
Résistance à l'orniérage			27.5
1 000 cycles			35.9
3 000 cycles			41.0
10 000 cycles			47.4
30 000 cycles			43.2
Resuage			-

Granulat recyclé			
Pourcentage de l'additif, P _{add} (%)	15		
Pourcentage de bitume de l'additif, P _{beadd} (%)	5.06		
Pourcentage mobilisable, P _{mob} (%)	100		
Pourcentage de bitume dans l'EB, P _{be} (%)	0.76		
Entente D _{min}	2.533		
Ratio de Bitume Recyclé, RBR (%)	15.1		

TSRST (n=3)	
Vitesse de refroidissement (°C/h)	9.97
Température de rupture moyenne, θ _{rupture} (°C)	-34.5
Contrainte à la rupture moyenne σ _{rupture} (kPa)	2416

MUN-10 R30 (FM)																				
Granulats utilisés				Granulométrie																
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Absor (ABS), Bouteau (BPT), Cillium (C), Cillière lavé (CL), Recyclé (GBR), Pierre (P), Score (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).		Tamis en mm (% passant)										Tamis en µm (% passant)							
	(ID)	Provenance	28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption en eau des granulats (%)
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	93	11	4	3	3	2	2	1.5	11	11	2.721	2.756	0.47		
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	83	18	5	2	1	1	0.3	0	0	2.721	2.762	0.54		
2,5 - 5 mm	SM	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	83	55	37	25	13	5.8	45	45	2.723	2.745	0.29		
0 - 5 mm	C	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	64	45	33	24	17	10.7	12	12	2.718	2.750	0.43		
0 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44		
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	30	2.714	2.714	0		
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1		
Granulométrie du combiné			100	100	100	99	84.2	67	48	35	25	15	8.6	100	100	2.719	2.738	0.25		

Formule et exigences																			
Formule		Tamis en mm (% passant)				Tamis en µm (% passant)				Vides N _g (cycles)	Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide N _{design} (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)	
		28	20	14	10	5.00	2.5	1.25	630							315	160		80
Max		-	100	100	95	70	-	-	-	-	-	4							
Spéc.	Min	-	100	100	100	85	-	-	-	-	-	10						0.49	

Caractéristiques de la formule									
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)									
52S-34									
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)									
52S-34									
Densité du bitume d'ajout, D _b									
1.020									
Densité effective des granulats, D _{gr}									
2.756									
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)									
4.544									
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)									
11.31									
Total granulométrique, TG (%)									
581									
Rapport du bitume/total granul.									
0.86									
Film de bitume effectif, FBE (µm)									
5.07									
Surface spécifique, SS (m2/kg)									
9.25									
Rapport Passant 80µm/bitume									
1.72									

Granulats recyclés									
Pourcentage de l'additif, P _{ast} (%)									
30									
Pourcentage de bitume de l'additif, P _{adbit} (%)									
5.06									
Pourcentage mobilisable, P _{mob} (%)									
100									
Pourcentage de bitume dans l'EB, P _{eb} (%)									
1.52									
Entente D _{mm}									
2.533									
Ratio de Bitume Recyclé, RBR (%)									
30.2									

TSRST (n=3)									
Vitesse de refroidissement (°C/h)									
9.98									
Température de rupture moyenne, θ _{rupture} (°C)									
-29.8									
Contrainte à la rupture moyenne σ _{rupture} (kPa)									
2950									

Module complexe									
Température (°C)		Fréquence, Ff (Hz)		Module, E* (Mpa)		Angle de phase, φ (°)			
-25.0		10		27744		2.7			
-25.0		1		25590		3.8			
-25.0		0.1		22848		5.3			
5.0		10		9659		16.6			
5.0		1		5851		23.4			
5.0		0.1		2908		31.3			
25.0		10		1700		35.9			
25.0		1		621		41.9			
25.0		0.1		196		44.7			

PCG									
N _g (cycles)		Vides (%)		Spéc. (%)					
10		12.1		≥ 11.0					
80		6.5		4.0 - 7.0					
200		4.6		≤ 2.0					
Resuage		Non		---					
Résistance à l'orniérage									
1 000 cycles				4.4					
3 000 cycles				6.1					
10 000 cycles				8.9					
30 000 cycles				12.1					
Resuage				-					

Figure A VI.15 Feuille de formule MUN-10 R30 (FM)

MUN-10 R45 (FM)																						
Granulats utilisés				Granulométrie																		
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID), Absorbé (AB), Biseau (BFI), Calibre (C), Calture lavé (CL), Recyclé (GBR), Pierre (P), Soutie (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).	Tamis en mm (% passant)										Tamis en µm (% passant)						Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption des granulats (%)
		(ID)	Provenance	28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Brute					
5 - 10 mm	P	100	100	100	93	11	4	3	3	2	2	1.5	10	10	2.721	2.756	0.47					
2,5 - 5 mm	P	100	100	100	100	83	18	5	2	1	1	0.3	0	0	2.721	2.762	0.54					
2,5 - 5 mm	SM	100	100	100	100	100	83	55	37	25	13	5.8	43	43	2.723	2.745	0.29					
0 - 5 mm	C	100	100	100	100	100	64	45	33	24	17	10.7	0	0	2.718	2.750	0.43					
0 - 5 mm	P	100	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	2.718	2.750	0.44					
GBR 0-10	GBR	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	45	45	2.714	2.714	0					
Filler	F	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1				
Granulométrie du combiné		100	100	100	99	82.1	67	50	37	26	15	8.5	100	100	2.718	2.732	0.19					

Formule et exigences											
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)				
	28	20	14	10	5.00	2.5	1.25	630	315	160	80
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26	15	8.5
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-	-	4
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-	-	10

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95	70	-	-	-
	Min	-	100	100	100	85	-	-	-

Formule et exigences									
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)		
	28	20	14	10	5.00	2.5	630	315	160
	100	100	100	99	82.1	67	50	37	26
Spéc.	Max	-	100	100	95				

MUN-10 R100 (FM)																				
Granulats utilisés				Granulométrie																
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID), Absorbé (AB), Bandeau (BPF), Chaleur (C), Criblure lavé (CL), Recyclé (GBR), Pierre (P), Soutie (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).	Tamis en mm (% passant)										Tamis en µm (% passant)						Absorption en eau des granulats (%)		
		(ID)	Provenance	28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Proportion (%)		Densité des granulats	
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	90	10	4	3	2	2	2	1.3	0	0	2.721	2.756	0.47		
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	83	18	5	2	1	1	0.3	0	2.721	2.762	0.54		
2,5 - 5 mm	SM	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	100	92	68	47	29	14	4.7	0	2.723	2.745	0.29		
0 - 5 mm	C	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	92	63	45	33	24	17	10.4	0	2.718	2.750	0.43		
0 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	2.718	2.750	0.44		
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	100	100	2.714	2.714	0		
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	2.700	2.775	1		
Granulométrie du combiné			100	100	100	99	80.0	64	53	41	28	15	8.6	100	100	2.714	2.714	0.00		

Formule et exigences													
Formule		Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)						
		28	20	14	10	5.00	2.5	1.25	630	315	160	80	
		100	100	100	100	99	80.0	64	53	41	28	15	8.6
Spéc.	Max	-	100	100	100	95	70	-	-	-	-	4	
	Min	-	100	100	100	100	85	-	-	-	-	10	

Caractéristiques de la formule									
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)									
52S-34									
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)									
52S-34									
Densité du bitume d'ajout, D _b									
1.020									
Densité effective des granulats, D _{gr}									
2.751									
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)									
4.583									
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)									
11.38									
Total granulométrique, TG (%)									
589									
Rapport du bitume/total granul.									
0.86									
Film de bitume effectif, FBE (µm)									
4.88									
Surface spécifique, SS (m2/kg)									
9.69									
Rapport Passant 80µm/bitume									
1.70									

Module complexe				
Température (°C)	Fréquence, F _r (Hz)	Module, E* (Mpa)	Angle de phase, φ (°)	
-25.0	10	31337	1.6	
-25.0	1	29910	2.1	
-25.0	0.1	28110	2.8	
5.0	10	18479	7.0	
5.0	1	15114	9.1	
5.0	0.1	11603	12.2	
25.0	10	9096	15.3	
25.0	1	5762	21.2	
25.0	0.1	3079	26.3	

PCG				
N _{passions}	Vides (%)	Spéc. (%)		
10	8.9	≥ 11.0		
80	3.2	4.0 - 7.0		
200	2.3	≤ 2.0		
Resuage	Non	---		
Résistance à l'orniérage				
1 000 cycles				
1.2				
3 000 cycles				
2.2				
10 000 cycles				
3.4				
30 000 cycles				
4.9				
Resuage				
-				

Granulats recyclés				
Pourcentage de l'additif, P _{add} (%)				
100				
Pourcentage de bitume de l'additif, P _{add} (%)				
5.06				
Pourcentage mobilisable, P _{mob} (%)				
100				
Pourcentage de bitume dans l'EB, P _{eb} (%)				
5.06				
Entente D _{min}				
2.533				
Ratio de Bitume Recyclé, RBR (%)				
100.0				

TSRST (n=3)				
Vitesse de refroidissement (°C/h)				
9.97				
Température de rupture moyenne, θ _{rupture} (°C)				
-16.9				
Contrainte à la rupture moyenne σ _{rupture} (kPa)				
2331				

Figure A VI.17 Feuille de formule MUN-10 R100 (FM)

MUN-10 R15 (60M)																			
Granulats utilisés				Granulométrie															
Calibre / Classe granulaire	Tamis en mm (% passant)																		Absorption des granulats (%)
	(ID)	Provenance		28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Proportion (%)		Densité des granulats		
5 - 10 mm	P		Sables L-G, St-Hypolyte	100	100	100	93	11	4	3	3	2	2	1.5	13	13	2.721	2.756	0.47
2,5 - 5 mm	P		Sables L-G, St-Hypolyte	100	100	100	100	83	18	5	2	1	1	0.3	0	0	2.721	2.762	0.54
2,5 - 5 mm	SM		Sables L-G, St-Hypolyte	100	100	100	100	100	83	55	37	25	13	5.8	49	49	2.723	2.745	0.29
0 - 5 mm	C		Sables L-G, St-Hypolyte	100	100	100	100	100	64	45	33	24	17	10.7	21	21	2.718	2.750	0.43
0 - 5 mm	P		Sables L-G, St-Hypolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44
GBR 0-10	GBR		CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	15	15	2.714	2.714	0
Filler	F		Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1
Granulométrie du combiné				100	100	100	99	85.4	66	47	34	24	14	8.6	100	100	2.720	2.743	0.31

Formule et exigences																			
Formule	Tamis en mm (% passant)								Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)			
	28	14	10	5.00	2.5	1.25	630	315						160	80				
	100	100	100	99	85.4	66	47	34	24	14	8.6	5.28	4.52	5.7	17.2		70.8	2.379	2.523
Spéc.	Max	-	100	100	70	-	-	-	-	-	4								
	Min	-	100	100	85	-	-	-	-	-	10								

Caractéristiques de la formule			
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)	52S-34		
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)	52S-34		
Densité du bitume d'ajout, D _b	1.020		
Densité effective des granulats, D _{se}	2.748		
Pourcentage de bitume effectif, P _{se} (%)	4.912		
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)	12.15		
Total granulométrique, TG (%)	578		
Rapport du bitume/total granul.	0.91		
Film de bitume effectif, FBE (µm)	5.60		
Surface spécifique, SS (m2/kg)	9.08		
Rapport Passant 80µm/bitume	1.62		

Granulat recyclé			
Pourcentage de l'additif, P _{asf} (%)	15		
Pourcentage de bitume de l'additif, P _{asbt} (%)	5.06		
Pourcentage mobilisable, P _{mob} (%)	100		
Pourcentage de bitume dans l'EB, P _{bet} (%)	0.76		
Entente D _{min}	2.533		
Ratio de Bitume Recyclé, RBR (%)	14.4		

TSRST (n=3)			
Vitesse de refroidissement (°C/h)	9.97		
Température de rupture moyenne, θ _{rupture} (°C)	-29.2		
Contrainte à la rupture moyenne σ _{rupture} (kPa)	3179		

Module complexe			
Température (°C)	Fréquence, Fr (Hz)	Module, E* (Mpa)	Angle de phase, φ (°)
-25.0	10	26449	3.3
-25.0	1	23939	4.7
-25.0	0.1	20779	6.6
5.0	10	8459	19.2
5.0	1	4723	27.0
5.0	0.1	2123	35.4
25.0	10	1452	38.5
25.0	1	490	45.9
25.0	0.1	136	50.1

Figure A VI.18 Feuille de formule MUN-10 R15 (60M)

MUN-10 R30 (60M)																						
Granulats utilisés				Granulométrie																		
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID), Absorbé (AB), Biseau (BFI), Calibre (C), Calture lavé (CL), Recyclé (GBR), Pierre (P, Soutie (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).	Tamis en mm (% passant)										Tamis en µm (% passant)						Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption en eau des granulats (%)
		(ID)	Provenance	28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Brute	Apparente				
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	93	11	4	3	3	2	2	1.5	11	11	2.721	2.756	0.47				
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	83	18	5	2	1	1	0.3	0	0	2.721	2.762	0.54				
2,5 - 5 mm	SM	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	83	55	37	25	13	5.8	45	45	2.723	2.745	0.29				
0 - 5 mm	C	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	100	64	45	33	24	17	10.7	12	2.718	2.750	0.43				
0 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	30	2.714	2.714	0				
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2.700	2.775	1				
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	99	84.2	67	48	35	25	15	8.6	100	2.719	2.738	0.25				
Granulométrie du combiné			100	100	100	100	99	84.2	67	48	35	25	15	8.6	100	2.719	2.738	0.25				

Formule et exigences											
Formule	Tamis en mm (% passant)						Tamis en µm (% passant)				
	28	20	14	10	5.00	2.5	1.25	630	315	160	80
	100	100	100	100	99	84.2	67	48	35	25	15
Max	-	100	100	100	95	70	-	-	-	-	4
Spéc.	-	100	100	100	85	-	-	-	-	-	10

Caractéristiques de la formule									
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)									
52S-34									
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)									
52S-34									
Densité du bitume d'ajout, D _b									
1.020									
Densité effective des granulats, D _{gr}									
2.757									
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)									
5.134									
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)									
12.66									
Total granulométrique, TG (%)									
581									
Rapport du bitume/total granul.									
0.97									
Film de bitume effectif, FBE (µm)									
5.76									
Surface spécifique, SS (m2/kg)									
9.25									
Rapport Passant 80µm/bitume									
1.54									

Module complexe				
Température (°C)	Fréquence, Ff (Hz)	Module, E* (Mpa)	Angle de phase, φ (°)	
-25.0	10	29213	2.4	
-25.0	1	27134	3.5	
-25.0	0.1	24455	4.8	
5.0	10	10238	16.7	
5.0	1	6145	24.4	
5.0	0.1	2924	33.8	
25.0	10	1480	40.1	
25.0	1	476	47.2	
25.0	0.1	130	48.1	

PCG				
N _{passions}	Vides (%)		Spéc. (%)	
	10	10.5	≥ 11.0	
10	10.5 <td>≥ 11.0</td> <td></td> <td></td>	≥ 11.0		
80	4.6	4.0 - 7.0		
200	2.8	≤ 2.0		
Reessuage	Non	Non	---	
Résistance à l'orniérage				
1 000 cycles				
5.1				
3 000 cycles				
6.4				
10 000 cycles				
8.9				
30 000 cycles				
13.3				
Reessuage				
-				

Granulat recyclé				
Pourcentage de l'additif, P _{add} (%)				
30				
Pourcentage de bitume de l'additif, P _{addB} (%)				
5.06				
Pourcentage mobilisable, P _{mob} (%)				
100				
Pourcentage de bitume dans l'EB, P _{EB} (%)				
1.52				
Entente D _{min}				
2.533				
Ratio de Bitume Recyclé, RBR (%)				
27.0				

TSRST (n=3)				
Vitesse de refroidissement (°C/h)				
9.97				
Température de rupture moyenne, θ _{rupture} (°C)				
-30.5				
Contrainte à la rupture moyenne σ _{rupture} (kPa)				
3302				

Figure A VI.19 Feuille de formule MUN-10 R30 (60M)

MUN-10 R45 (60M)																						
Granulats utilisés				Granulométrie																		
Calibre / Classe granulaire	Identification (ID) : Absorbé (AB), Biseau (BPF), Chaleur (C), Criblure lavé (CL), Recyclé (GBR), Pierre (Pi, Sorte (SC), Sable manufacturé (SM), Filler (F).		Tamis en mm (% passant)										Tamis en µm (% passant)					Proportion (%)		Densité des granulats		Absorption des granulats (%)
	(ID)	Provenance	28	20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	Ciblée	Réelle	Brute	Apparente					
5 - 10 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	93	11	4	3	3	2	2	1.5	10	10	2.721	2.756	0.47				
2,5 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	83	18	5	2	1	1	0.3	0	0	2.721	2.762	0.54				
2,5 - 5 mm	SM	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	83	55	37	25	13	5.8	43	43	2.723	2.745	0.29				
0 - 5 mm	C	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	100	64	45	33	24	17	10.7	0	0	2.718	2.750	0.43				
0 - 5 mm	P	Sables L-G, St-Hippolyte	100	100	100	100	92	55	34	21	12	6	1.9	0	0	2.718	2.750	0.44				
GBR 0-10	GBR	CMM, Montréal	100	100	100	99	80	64	53	41	28	15	8.6	45	45	2.714	2.714	0				
Filler	F	Filler de fracturation usine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2	2	2.700	2.775	1				
Granulométrie du combiné			100	100	100	99	82.1	67	50	37	26	15	8.5	100	100	2.718	2.732	0.19				
Formule et exigences																						
Formule		Tamis en mm (% passant)					Tamis en µm (% passant)					Bitume TOTAL (%)	Bitume d'ajout (%)	Vide Ndesign (%)	VAM (%)	VCB (%)	Densité		Bitume absorbé (%)			
		28	20	14	10	5.00	2.5	1.25	630	315	160						80					
Max		100	100	100	99	82.1	67	50	37	26	15	8.5										
		100	100	100	95	70	-	-	-	-	-	4										
Spéc.		100	100	100	100	85	-	-	-	-	-	10										
		100	100	100	100	85	-	-	-	-	-	10										
Caractéristiques de la formule																						
Classe de performance de bitume spécifiée (PG)		52S-34																				
Classe de bitume utilisée en formulation (PG)		52S-34																				
Densité du bitume d'ajout, D _b		1.020																				
Densité effective des granulats, D _{gr}		2.762																				
Pourcentage de bitume effectif, P _{be} (%)		5.449																				
Volume de bitume effectif 0% de vide, VBE (%)		13.38																				
Total granulométrique, TG (%)		583																				
Rapport du bitume/total granul.		1.03																				
Film de bitume effectif, FBE (µm)		6.10																				
Surface spécifique, SS (m2/kg)		9.31																				
Rapport Passant 80µm/bitume		1.42																				
Module complexe																						
Température (°C)		Fréquence, Fr (Hz)		Module, E* (Mpa)		Angle de phase, φ (°)																
-25.0		10		31458		2.3																
-25.0		1		29346		3.2																
-25.0		0.1		26675		4.4																
5.0		10		12228		13.9																
5.0		1		8029		20.3																
5.0		0.1		4298		29.4																
25.0		10		2502		35.5																
25.0		1		898		43.5																
25.0		0.1		269		48.1																
PCG																						
N _{passions}		Vides (%)		Spéc. (%)																		
10		9.4		≥ 11.0																		
80		3.4		4.0 - 7.0																		
200		2.1		≤ 2.0																		
Resuage		Non		---																		
Résistance à l'orniérage																						
1 000 cycles		4.6																				
3 000 cycles		6.4																				
10 000 cycles		9.1																				
30 000 cycles		13.1																				
Resuage		-																				

Figure A VI.20 Feuille de formule MUN-10 R45 (60M)

ANNEXE VII

RÉSULTATS BRUTS DES ESSAIS RÉALISÉS

Tableau A VII.1 Résultats BBR RAP-1

Temperature	Test	Time (s)	Force (mN)	Deflection (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
-12°C	1	8	984	0.359	221	221	0	0.284
		15	985	0.432	184	184	0	0.303
		30	984	0.536	148	148	0	0.324
		60	984	0.677	117	117	0	0.345
		120	984	0.867	92	92	0.219	0.367
		240	984	1.125	71	71	0.142	0.388
	2	8	985	0.331	240	240	0	0.276
		15	985	0.397	200	200	0	0.297
		30	986	0.492	162	162	0	0.321
		60	986	0.619	128	128	0	0.345
		120	986	0.794	100	100	0	0.369
		240	986	1.034	77	77	0	0.393
-18°C	1	8	990	0.186	429	429	0	0.227
		15	991	0.216	370	370	0	0.248
		30	991	0.259	309	309	0	0.271
		60	992	0.315	254	254	0	0.294
		120	992	0.389	206	206	0	0.317
		240	992	0.489	164	164	0	0.339
	2	8	990	0.188	425	424	-0.235	0.228
		15	991	0.219	365	365	0	0.248
		30	992	0.262	305	305	0	0.27
		60	992	0.318	252	251	-0.397	0.292
		120	994	0.393	204	204	0	0.314
		240	994	0.493	163	162	-0.613	0.337

Tableau A VII.2 Résultats BBR RAP-2

Temperature	Test	Time (s)	Force (mN)	Deflection (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
-12°C	1	8	988	0.209	381	381	0	0.244
		15	989	0.246	324	325	0.309	0.264
		30	989	0.297	268	268	0	0.286
		60	989	0.365	218	218	0	0.308
		120	989	0.455	175	175	0	0.331
		240	990	0.578	138	138	0	0.353
	2	8	990	0.206	387	388	0.258	0.243
		15	990	0.242	330	330	0	0.264
		30	991	0.293	273	273	0	0.286
		60	992	0.360	222	222	0	0.309
		120	991	0.450	178	178	0	0.332
		240	992	0.571	140	140	0	0.354
-18°C	1	8	991	0.119	671	673	0.298	0.203
		15	992	0.135	592	589	-0.507	0.22
		30	994	0.160	501	503	0.399	0.239
		60	994	0.189	424	423	-0.236	0.257
		120	994	0.228	352	352	0	0.276
		240	994	0.277	289	289	0	0.294
	2	8	992	0.110	727	726	-0.138	0.203
		15	993	0.126	635	636	0.157	0.22
		30	995	0.148	542	542	0	0.238
		60	995	0.175	458	457	-0.218	0.257
		120	996	0.211	381	380	-0.262	0.275
		240	996	0.257	312	312	0	0.293

Tableau A VII.3 Résultats BBR RAP-3

Temperature	Test	Time (s)	Force (mN)	Deflection (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
-12°C	1	8	994	0.305	239	239	0	0.251
		15	994	0.364	201	201	0	0.270
		30	995	0.447	163	163	0	0.292
		60	994	0.556	144	144	0	0.329
		120	993	0.703	121	121	0	0.339
		240	993	0.901	99	99	0	0.350
	2	8	972	0.305	229	229	0	0.250
		15	973	0.364	205	205	0	0.271
		30	973	0.447	161	161	0	0.293
		60	977	0.556	144	144	0	0.329
		120	973	0.703	120	120	0	0.341
		240	972	0.901	95	95	0	0.351
-18°C	1	8	989	0.305	237	237	0	0.215
		15	991	0.364	201	201	0	0.231
		30	991	0.447	165	165	0	0.259
		60	990	0.556	262	262	0	0.286
		120	989	0.703	185	185	0	0.299
		240	988	0.901	125	125	0	0.315
	2	8	983	0.305	240	240	0	0.214
		15	982	0.364	210	210	0	0.232
		30	984	0.447	170	170	0	0.261
		60	985	0.556	262	262	0	0.286
		120	986	0.703	190	190	0	0.301
		240	987	0.901	130	130	0	0.315

Tableau A VII.4 Résultats BBR RAP-4

Temperature	Test	Time (s)	Force (mN)	Deflection (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
-12°C	1	8	998	0.143	563	562	-0.178	0.226
		15	998	0.166	485	485	0	0.246
		30	998	0.198	406	406	0	0.269
		60	999	0.241	334	334	0	0.291
		120	998	0.297	271	271	0	0.314
		240	999	0.372	217	216	-0.461	0.336
	2	8	1000	0.148	545	546	0.183	0.223
		15	1001	0.171	472	471	-0.212	0.244
		30	1001	0.204	396	395	-0.253	0.266
		60	1000	0.248	325	326	0.308	0.289
		120	1000	0.305	264	265	0.379	0.311
		240	1001	0.381	212	212	0	0.334
-18°C	1	8	1016	0.089	920	921	0.109	0.171
		15	1016	0.100	819	822	0.366	0.19
		30	1017	0.114	719	715	-0.556	0.212
		60	1016	0.134	611	613	0.327	0.234
		120	1015	0.159	515	517	0.388	0.256
		240	1015	0.190	431	430	-0.232	0.277
	2	8	1009	0.093	875	874	-0.114	0.167
		15	1009	0.104	782	781	-0.128	0.19
		30	1009	0.120	678	678	0	0.216
		60	1010	0.140	582	579	-0.515	0.241
		120	1010	0.167	488	486	-0.41	0.267
		240	1011	0.203	402	400	-0.498	0.292

Tableau A VII.5 Résultats BBR RAP-5

Temperature	Test	Time (s)	Force (mN)	Deflection (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
-12°C	1	8	986	0.332	239	239	0	0.27
		15	986	0.396	201	201	0	0.288
		30	987	0.487	163	163	0	0.308
		60	988	0.607	131	131	0	0.327
		120	988	0.768	104	104	0	0.346
		240	988	0.982	81	81	0.123	0.366
	2	8	985	0.368	216	216	0	0.268
		15	987	0.439	181	181	0	0.288
		30	989	0.540	148	147	-0.676	0.309
		60	989	0.675	118	118	0	0.331
		120	990	0.855	93	93	-0.321	0.353
		240	991	1.100	73	72	-0.413	0.374
-18°C	1	8	1001	0.209	386	386	0	0.209
		15	1000	0.240	336	337	0.298	0.225
		30	999	0.281	287	287	0	0.242
		60	998	0.335	240	241	0.417	0.259
		120	1001	0.404	200	200	0	0.277
		240	998	0.492	164	164	0	0.294
	2	8	989	0.337	237	236	-0.422	0.211
		15	990	0.389	205	205	0	0.235
		30	991	0.463	173	173	0	0.261
		60	993	0.559	143	143	0	0.287
		120	994	0.688	116	116	0	0.314
		240	992	0.865	92	93	0.108	0.34

Tableau A VII.6 Résultats BBR RAP-6

Temperature	Test	Time (s)	Force (mN)	Deflection (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
-12°C	1	8	980	0.296	267	267	0	0.257
		15	979	0.350	226	226	0	0.275
		30	979	0.426	185	185	0	0.295
		60	979	0.526	150	150	0	0.315
		120	978	0.659	120	120	0	0.334
		240	977	0.835	94	94	0.106	0.354
	2	8	980	0.284	278	278	0	0.255
		15	979	0.336	235	236	0.426	0.273
		30	979	0.408	193	194	0.518	0.292
		60	979	0.503	157	157	0	0.312
		120	978	0.627	126	126	0	0.331
		240	978	0.797	99	99	0.303	0.351
-18°C	1	8	993	0.147	545	544	-0.183	0.214
		15	993	0.170	471	473	0.425	0.232
		30	993	0.200	400	400	0	0.252
		60	993	0.240	334	333	-0.299	0.272
		120	991	0.292	274	274	0	0.291
		240	990	0.359	222	223	0.45	0.311
	2	8	994	0.163	492	492	0	0.218
		15	994	0.188	426	427	0.235	0.235
		30	993	0.222	361	360	-0.277	0.253
		60	993	0.266	301	300	-0.332	0.271
		120	993	0.324	247	247	0	0.289
		240	993	0.397	202	201	-0.495	0.308

Tableau A VII.7 Résultats BBR RAP-7

Temperature	Test	Time (s)	Force (mN)	Deflection (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
-12°C	1	8	978	0.602	131	131	0	0.327
		15	978	0.750	105	105	0	0.355
		30	980	0.970	81	82	0.123	0.387
		60	977	1.276	62	62	0	0.418
		120	977	1.717	46	46	-0.436	0.45
		240	975	2.382	33	33	0.303	0.481
	2	8	972	0.617	127	127	0	0.329
		15	973	0.767	102	102	0	0.352
		30	973	0.987	79	80	0.126	0.377
		60	977	1.294	61	61	-0.328	0.403
		120	973	1.726	45	46	0	0.428
		240	972	2.336	34	34	0.299	0.453
-18°C	1	8	989	0.324	246	246	0	0.275
		15	991	0.390	205	205	0	0.298
		30	991	0.481	166	166	0	0.323
		60	990	0.607	132	131	-0.758	0.348
		120	989	0.779	102	102	0	0.372
		240	988	1.014	79	78	-0.382	0.397
	2	8	983	0.298	266	265	-0.376	0.283
		15	982	0.359	221	221	0	0.3
		30	984	0.446	178	178	0	0.32
		60	985	0.558	142	142	0	0.339
		120	986	0.710	112	111	-0.893	0.359
		240	987	0.922	86	86	-0.116	0.378

Tableau A VII.8 Résultats BBR RAP-8

Temperature	Test	Time (s)	Force (mN)	Deflection (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
-12°C	1	8	988	0.501	150	150	0	0.300
		15	989	0.605	132	132	0	0.327
		30	989	0.741	106	105	0	0.355
		60	989	0.97	86	86	0	0.371
		120	989	1.262	61	62	0.123	0.415
		240	990	1.742	44	44	0	0.45
	2	8	990	0.512	148	148	0	0.301
		15	990	0.616	130	130	0	0.326
		30	991	0.752	104	104	0	0.358
		60	992	0.981	86	86	0	0.371
		120	991	1.273	62	62	0	0.411
		240	992	1.753	45	45	0	0.452
-18°C	1	8	993	0.301	260	260	0	0.25
		15	993	0.324	246	246	0	0.275
		30	993	0.39	205	205	0	0.298
		60	993	0.415	176	176	0	0.321
		120	991	0.54	148	147	-0.676	0.309
		240	990	0.675	118	118	0	0.331
	2	8	994	0.301	260	260	0	0.25
		15	994	0.324	246	246	0	0.275
		30	993	0.39	205	205	0	0.298
		60	993	0.415	176	176	0	0.321
		120	993	0.54	148	147	-0.676	0.309
		240	993	0.675	118	118	0	0.331

Tableau A VII.9 Résultats DSR (diamètre 25 mm) PG 52S-34

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	1.40	20.5	81.0	52.0	1.59	1.40	8.0	83.4	70.0	1.59	1.40	0.2	89.3
	10	1.40	102.1	77.2		10	1.40	42.2	79.7		10	1.24	1.0	87.4
	9	1.41	93.4	77.6		9	1.41	38.4	80.1		9	1.37	0.9	87.7
	8	1.40	84.5	77.9		8	1.40	34.7	80.4		8	1.37	0.8	87.8
	7	1.40	75.4	78.1		7	1.40	30.8	80.6		7	1.37	0.7	88.1
	6	1.41	66.0	78.4		6	1.41	26.8	80.9		6	1.39	0.6	88.2
	5	1.40	56.4	78.9		5	1.40	22.8	81.2		5	1.39	0.5	88.5
	4	1.40	46.4	79.3		4	1.40	18.6	81.7		4	1.37	0.4	88.7
	3	1.40	36.1	79.8		3	1.40	14.3	82.2		3	1.39	0.3	88.9
	2	1.40	25.2	80.6		2	1.40	9.9	83.0		2	1.40	0.2	89.2
	1.59	1.40	20.5	81.0		1.59	1.40	8.0	83.4		1.59	1.40	0.2	89.3
	1	1.40	13.5	81.9		1	1.39	5.2	84.2		1	1.40	0.1	89.5
	0.9	1.41	12.3	82.1		0.9	1.40	4.7	84.4		0.9	1.40	0.1	89.6
	0.8	1.39	11.0	82.4		0.8	1.40	4.2	84.6		0.8	1.40	0.1	89.6
	0.7	1.40	9.7	82.6		0.7	1.40	3.7	84.8		0.7	1.40	0.1	89.6
	0.6	1.40	8.4	82.9		0.6	1.40	3.2	85.1		0.6	1.40	0.1	89.6
40.0	0.5	1.40	7.1	83.2	58.0	0.5	1.40	2.7	85.4	76.0	0.5	1.40	0.1	89.7
	0.4	1.40	5.8	83.7		0.4	1.44	2.2	85.8		0.4	1.40	0.0	89.7
	0.3	1.40	4.4	84.2		0.3	1.40	1.6	86.3		0.3	1.40	0.0	89.7
	0.2	1.40	3.0	84.9		0.2	1.40	1.1	86.9		0.2	1.40	0.0	89.8
	0.1	1.82	1.6	86.0		0.1	1.83	0.6	88.0		0.1	1.40	0.0	89.8
	1.59	1.40	8.0	83.4		1.59	1.35	3.2	85.4		1.59	1.40	0.1	89.5
	10	1.40	42.2	79.7		10	1.24	17.8	82.1		10	1.24	0.6	87.8
	9	1.41	38.4	80.1		9	1.36	16.2	82.4		9	1.37	0.5	88.1
	8	1.40	34.7	80.4		8	1.36	14.6	82.6		8	1.37	0.5	88.4
	7	1.40	30.8	80.6		7	1.37	12.9	82.8		7	1.37	0.4	88.6
	6	1.41	26.8	80.9		6	1.39	11.2	83.1		6	1.39	0.3	88.8
	5	1.40	22.8	81.2		5	1.39	9.4	83.5		5	1.39	0.3	89.0
	4	1.40	18.6	81.7		4	1.37	7.7	83.8		4	1.37	0.2	89.1
	3	1.40	14.3	82.2		3	1.39	5.9	84.3		3	1.39	0.2	89.3
	2	1.40	9.9	83.0		2	1.40	4.0	85.0		2	1.40	0.1	89.4
	1.59	1.40	8.0	83.4		1.59	1.40	3.2	85.4		1.59	1.40	0.1	89.5
	1	1.39	5.2	84.2		1	1.40	2.1	86.1		1	1.40	0.1	89.6
46.0	0.9	1.40	4.7	84.4	64.0	0.9	1.40	1.9	86.3	82.0	0.9	1.40	0.1	89.6
	0.8	1.40	4.2	84.6		0.8	1.40	1.7	86.5		0.8	1.40	0.0	89.6
	0.7	1.40	3.7	84.8		0.7	1.40	1.5	86.7		0.7	1.40	0.0	89.6
	0.6	1.40	3.2	85.1		0.6	1.41	1.3	86.9		0.6	1.40	0.0	89.7
	0.5	1.40	2.7	85.4		0.5	1.41	1.1	87.2		0.5	1.40	0.0	89.7
	0.4	1.44	2.2	85.8		0.4	1.39	0.8	87.5		0.4	1.40	0.0	89.7
	0.3	1.40	1.6	86.3		0.3	1.40	0.6	87.9		0.3	1.40	0.0	89.7
	0.2	1.40	1.1	86.9		0.2	1.40	0.4	88.3		0.2	1.40	0.0	89.7
	0.1	1.83	0.6	88.0		0.1	1.90	0.2	89.0		0.1	1.40	0.0	89.8
	1.59	1.35	3.2	85.4		1.59	1.36	1.4	87.0		1.59	1.40	0.1	89.4
	10	1.24	17.8	82.1		10	1.25	8.0	83.7		10	1.24	0.3	87.4
	9	1.36	16.2	82.4		9	1.36	7.2	84.2		9	1.37	0.3	88.2
	8	1.36	14.6	82.6		8	1.36	6.5	84.4		8	1.37	0.3	88.5
	7	1.37	12.9	82.8		7	1.37	5.7	84.6		7	1.37	0.2	88.8
	6	1.39	11.2	83.1		6	1.39	4.9	84.9		6	1.39	0.2	88.9
	5	1.39	9.4	83.5		5	1.39	4.2	85.1		5	1.39	0.2	89.0
	4	1.37	7.7	83.8		4	1.37	3.4	85.5		4	1.39	0.1	89.1
	3	1.39	5.9	84.3		3	1.39	2.6	86.0		3	1.39	0.1	89.1
	2	1.40	4.0	85.0		2	1.40	1.7	86.6		2	1.40	0.1	89.4
	1.59	1.40	3.2	85.4		1.59	1.40	1.4	87.0		1.59	1.40	0.1	89.5
	1	1.40	2.1	86.1		1	1.40	0.9	87.6		1	1.40	0.0	89.6
	0.9	1.40	1.9	86.3		0.9	1.40	0.8	87.8		0.9	1.40	0.0	89.6
	0.8	1.40	1.7	86.5		0.8	1.40	0.7	87.9		0.8	1.40	0.0	89.6
	0.7	1.40	1.5	86.7		0.7	1.40	0.6	88.1		0.7	1.40	0.0	89.6
	0.6	1.41	1.3	86.9		0.6	1.40	0.5	88.2		0.6	1.40	0.0	89.7
	0.5	1.41	1.1	87.2		0.5	1.41	0.4	88.4		0.5	1.40	0.0	89.8
	0.4	1.39	0.8	87.5		0.4	1.40	0.4	88.7		0.4	1.40	0.0	89.7
	0.3	1.40	0.6	87.9		0.3	1.40	0.3	88.9		0.3	1.40	0.0	89.8
	0.2	1.40	0.4	88.3		0.2	1.43	0.2	89.1		0.2	1.40	0.0	89.8
	0.1	1.90	0.2	89.0		0.1	1.40	0.1	89.5		0.1	1.40	0.0	89.9

Tableau A VII.10 Résultats DSR (diamètre 8 mm) PG 52S-34

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.19	27.5	80.3	16.0	1.59	0.19	567.0	71.2	-2.0	1.59	0.19	17510.8	49.9
	10	0.17	139.5	75.7		10	0.17	2319.8	66.1		10	0.19	44109.8	42.1
	9	0.19	126.1	76.4		9	0.19	2147.3	66.2		9	0.19	42094.7	42.4
	8	0.19	113.7	76.8		8	0.19	1970.1	66.6		8	0.19	39918.9	42.9
	7	0.19	101.1	77.1		7	0.19	1784.9	67.0		7	0.19	37523.7	43.5
	6	0.19	88.5	77.4		6	0.19	1591.3	67.5		6	0.19	34890.7	44.1
	5	0.19	75.3	77.9		5	0.19	1386.9	67.9		5	0.19	31956.3	44.9
	4	0.19	61.9	78.4		4	0.19	1170.4	68.7		4	0.19	28617.7	45.9
	3	0.19	47.9	79.0		3	0.19	938.4	69.4		3	0.19	24731.3	47.1
	2	0.19	33.4	79.8		2	0.19	683.7	70.5		2	0.19	19987.4	48.8
	1.59	0.19	27.2	80.3		1.59	0.19	570.4	71.1		1.59	0.19	17652.9	49.8
	1	0.19	17.9	81.2		1	0.19	394.1	72.2		1	0.19	13629.7	51.8
	0.9	0.19	16.2	81.4		0.9	0.19	362.1	72.4		0.9	0.19	12839.3	52.2
	0.8	0.19	14.5	81.7		0.8	0.19	329.4	72.6		0.8	0.19	12003.4	52.7
	0.7	0.19	12.9	81.9		0.7	0.19	295.8	72.9		0.7	0.19	11112.2	53.3
	0.6	0.19	11.2	82.2		0.6	0.19	260.9	73.2		0.6	0.19	10154.7	53.9
	0.5	0.19	9.5	82.6		0.5	0.19	225.0	73.6		0.5	0.19	9113.7	54.6
	0.4	0.19	7.7	82.9		0.4	0.19	187.3	74.1		0.4	0.19	7965.6	55.5
	0.3	0.19	5.9	83.5		0.3	0.19	147.7	74.6		0.3	0.19	6676.2	56.7
	0.2	0.19	4.0	84.1		0.2	0.19	105.4	75.4		0.2	0.19	5165.2	58.3
	0.1	0.19	2.1	84.9		0.1	0.18	58.9	77.4		0.1	0.19	3268.6	60.9
28.0	1.59	0.19	68.3	77.8	10.0	1.59	0.19	1835.5	65.7	-8.0	1.59	0.19	46645.3	40.6
	10	0.17	324.0	73.9		10	0.19	6599.9	58.7		10	0.19	97359.5	32.9
	9	0.19	297.4	74.3		9	0.19	6169.0	59.4		9	0.19	93981.0	33.4
	8	0.19	269.6	74.5		8	0.19	5714.4	59.8		8	0.19	90186.7	33.9
	7	0.19	241.4	74.8		7	0.19	5234.2	60.4		7	0.19	85933.9	34.4
	6	0.19	212.3	75.1		6	0.19	4723.4	61.0		6	0.19	81132.6	35.1
	5	0.19	182.3	75.4		5	0.19	4175.9	61.6		5	0.19	75687.1	35.8
	4	0.19	150.9	76.0		4	0.19	3582.7	62.5		4	0.19	69337.0	36.8
	3	0.19	118.2	76.5		3	0.19	2930.6	63.5		3	0.19	61714.7	38.0
	2	0.19	83.5	77.3		2	0.19	2194.0	64.9		2	0.19	51839.4	39.8
	1.59	0.19	68.5	77.7		1.59	0.19	1858.6	65.6		1.59	0.19	47043.0	40.8
	1	0.19	45.7	78.6		1	0.19	1319.7	67.0		1	0.19	38145.0	42.5
	0.9	0.19	41.7	78.9		0.9	0.19	1221.6	67.3		0.9	0.19	36370.4	43.0
	0.8	0.19	37.6	79.1		0.8	0.19	1119.9	67.6		0.8	0.19	34436.2	43.5
	0.7	0.19	33.4	79.4		0.7	0.19	1013.9	68.0		0.7	0.19	32334.6	44.0
	0.6	0.19	29.2	79.6		0.6	0.19	903.1	68.4		0.6	0.19	30007.3	44.7
	0.5	0.19	24.8	80.0		0.5	0.19	786.8	68.8		0.5	0.19	27447.1	45.4
	0.4	0.19	20.4	80.4		0.4	0.19	663.6	69.4		0.4	0.19	24555.1	46.4
	0.3	0.19	15.7	81.0		0.3	0.19	531.7	70.0		0.3	0.19	21179.5	47.6
	0.2	0.19	10.9	81.8		0.2	0.20	385.4	71.4		0.2	0.19	17089.2	49.3
	0.1	0.19	5.8	83.2		0.1	0.19	223.5	72.0		0.1	0.20	11609.2	52.2
22.0	1.59	0.19	190.0	74.8	4.0	1.59	0.19	5887.6	58.5					
	10	0.17	847.1	70.3		10	0.19	17877.7	50.9					
	9	0.19	778.7	70.9		9	0.19	16882.7	51.2					
	8	0.19	709.8	71.2		8	0.19	15816.7	51.7					
	7	0.19	638.6	71.5		7	0.19	14670.8	52.3					
	6	0.19	564.8	71.9		6	0.19	13432.3	52.9					
	5	0.19	488.0	72.4		5	0.19	12077.8	53.8					
	4	0.19	407.4	72.8		4	0.19	10578.8	54.6					
	3	0.19	322.3	73.5		3	0.19	8880.5	55.8					
	2	0.19	230.8	74.3		2	0.19	6894.5	57.5					
	1.59	0.19	190.7	74.8		1.59	0.19	5955.5	58.4					
	1	0.19	129.3	75.7		1	0.19	4392.2	60.2					
	0.9	0.19	118.5	75.9		0.9	0.19	4098.0	60.6					
	0.8	0.19	107.3	76.1		0.8	0.19	3789.2	61.0					
	0.7	0.19	95.8	76.3		0.7	0.19	3464.1	61.5					
	0.6	0.19	84.0	76.6		0.6	0.19	3119.9	62.0					
	0.5	0.19	71.9	77.0		0.5	0.19	2753.9	62.6					
	0.4	0.19	59.4	77.4		0.4	0.19	2357.7	63.4					
	0.3	0.19	46.4	78.0		0.3	0.19	1925.4	64.3					
	0.2	0.19	32.6	78.8		0.2	0.19	1439.5	65.6					
	0.1	0.19	17.6	80.3		0.1	0.19	862.5	67.5					

Tableau A VII. 11 Résultats DSR (diamètre 4 mm) PG 52S-34

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
0.0	1.59	0.100	17406.3	52.4	-18.0	1.59	0.099	249380.5	25.1
	10	0.100	46593.0	44.5		10	0.099	385941.2	18.7
	9	0.101	44283.0	44.7		9	0.099	377973.6	19.2
	8	0.100	41790.2	45.2		8	0.099	369244.1	19.6
	7	0.100	39110.7	45.8		7	0.099	359001.0	20.0
	6	0.101	36182.8	46.5		6	0.100	347307.4	20.5
	5	0.100	32939.9	47.3		5	0.099	333477.8	21.1
	4	0.100	29279.8	48.3		4	0.099	316609.7	21.9
	3	0.100	25056.2	49.5		3	0.099	295486.4	22.8
	2	0.100	19970.1	51.3		2	0.099	266204.3	24.3
	1.59	0.100	17506.9	52.3		1.59	0.099	250484.1	25.1
	1	0.100	13303.7	54.3		1	0.099	219835.5	26.7
	0.9	0.100	12490.6	54.7		0.9	0.099	213224.7	27.1
	0.8	0.100	11627.5	55.2		0.8	0.099	206079.3	27.5
	0.7	0.100	10713.4	55.8		0.7	0.099	198092.9	27.9
	0.6	0.100	9740.0	56.4		0.6	0.099	189018.5	28.5
	0.5	0.100	8682.4	57.2		0.5	0.099	178564.3	29.2
	0.4	0.101	7521.6	58.2		0.4	0.100	166175.8	30.0
	0.3	0.100	6226.9	59.4		0.3	0.100	151019.5	31.1
	0.2	0.101	4755.3	60.7		0.2	0.100	131189.1	32.7
	0.1	0.099	2931.8	63.3		0.1	0.100	101241.6	35.4
-6.0	1.59	0.100	48010.1	43.3	-24.0	1.59	0.099	394939.7	19.0
	10	0.100	106400.7	35.6		10	0.098	544124.5	13.6
	9	0.101	102254.0	35.8		9	0.099	536671.5	14.0
	8	0.100	97678.2	36.3		8	0.098	528059.1	14.3
	7	0.100	92625.3	36.9		7	0.099	517797.8	14.6
	6	0.101	87024.5	37.5		6	0.099	505575.1	15.0
	5	0.100	80699.5	38.3		5	0.098	491263.5	15.5
	4	0.100	73397.1	39.2		4	0.098	473198.9	16.2
	3	0.100	64692.2	40.5		3	0.099	449831.0	17.0
	2	0.100	53781.2	42.2		2	0.099	416304.8	18.2
	1.59	0.100	48290.9	43.2		1.59	0.099	397646.9	19.0
	1	0.100	38514.5	45.2		1	0.099	360898.0	20.4
	0.9	0.100	36552.5	45.6		0.9	0.099	352954.8	20.7
	0.8	0.100	34439.4	46.2		0.8	0.099	344031.8	21.1
	0.7	0.100	32182.9	46.7		0.7	0.099	333853.1	21.5
	0.6	0.100	29723.2	47.4		0.6	0.099	322137.7	22.0
	0.5	0.100	26996.3	48.2		0.5	0.099	308334.9	22.6
	0.4	0.100	23961.6	49.2		0.4	0.099	291747.7	23.4
	0.3	0.100	20457.7	50.4		0.3	0.099	271058.1	24.4
	0.2	0.100	16236.0	52.2		0.2	0.099	242810.3	25.8
	0.1	0.100	10740.3	55.1		0.1	0.099	198000.7	28.4
-12.0	1.59	0.100	117551.3	34.0	-30.0	1.59	0.098	545085.8	14.4
	10	0.099	216466.4	27.1		10	0.097	689574.0	10.1
	9	0.101	210074.7	27.2		9	0.098	682806.5	10.2
	8	0.099	202997.4	27.7		8	0.097	675354.7	10.4
	7	0.100	195113.4	28.2		7	0.097	666058.7	10.7
	6	0.100	186199.9	28.7		6	0.099	654657.6	11.1
	5	0.099	175814.7	29.4		5	0.098	641296.7	11.4
	4	0.099	163586.9	30.3		4	0.098	624296.6	12.1
	3	0.100	148546.9	31.4		3	0.098	601122.3	12.7
	2	0.100	128750.5	33.0		2	0.098	568264.3	13.7
	1.59	0.100	118396.8	33.9		1.59	0.098	549182.0	14.4
	1	0.100	99174.4	35.7		1	0.098	510780.7	15.7
	0.9	0.100	95199.8	36.2		0.9	0.098	502135.8	15.9
	0.8	0.100	90903.6	36.6		0.8	0.098	492535.0	16.2
	0.7	0.100	86215.6	37.2		0.7	0.098	481778.2	16.6
	0.6	0.100	80966.5	37.8		0.6	0.098	469494.4	17.0
	0.5	0.100	75038.8	38.5		0.5	0.098	454557.9	17.6
	0.4	0.100	68194.6	39.5		0.4	0.098	436398.4	18.2
	0.3	0.100	60117.4	40.7		0.3	0.099	412928.7	19.1
	0.2	0.100	50041.8	42.4		0.2	0.099	379910.2	20.4
	0.1	0.100	35808.1	45.4		0.1	0.099	324116.5	22.8

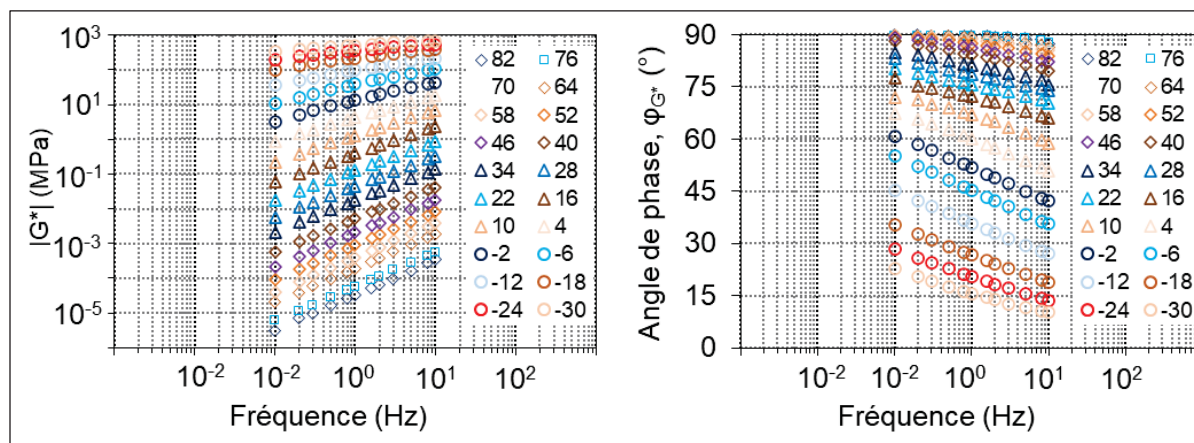


Figure A VII.1 Courbes isothermes PG 52S-34

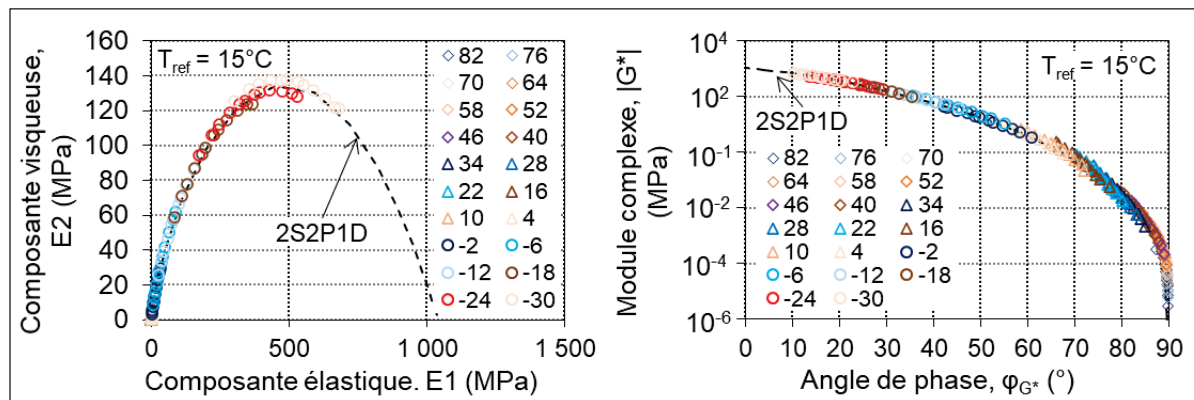


Figure A VII.2 Plans Cole-Cole et black PG 52S-34

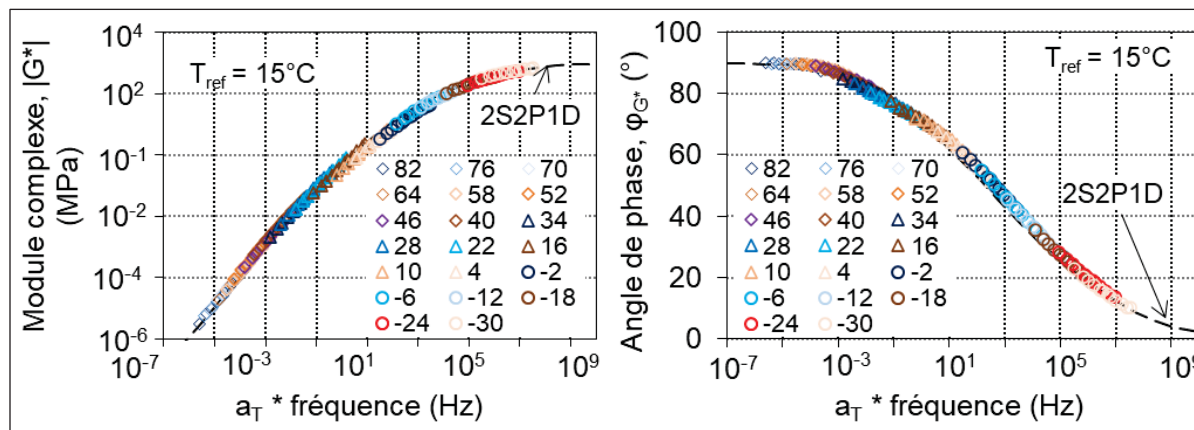


Figure A VII.3 Courbes maîtresses PG 52S-34

Tableau A VII. 12 Paramètres 2S2P1D PG 52S-34

2S2P1D ($T_{ref} : 15^{\circ}\text{C}$)						
G00 (MPa): 0	G0 (MPa): 1041	k: 0.305	h: 0.656	δ : 3.853	β : 51.4	C1: 12.5 C2: 110
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	82.0	76.0	70.0	64.0	58.0	
Tau	3.13E-10	5.00E-10	8.13E-10	1.88E-09	3.63E-09	
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	52.0	46.0	40.0	34.0	28.0	
Tau	6.88E-09	1.88E-08	4.38E-08	1.88E-07	5.00E-07	
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	22.0	15.0	10.0	4.0	-2.0	
Tau	1.88E-06	1.25E-05	7.50E-05	5.00E-04	3.75E-03	
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	-6.0	-12.0	-18.0	-24.0	-30.0	
Tau	1.75E-02	1.56E-01	1.56E+00	1.13E+01	4.06E+01	

Tableau A VII.13 Résultats DSR (diamètre 25 mm) PG 64E-28

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.50	104.3	65.8	52.0	1.59	0.50	45.9	66.2	70.0	1.59	0.50	1.6	68.2
	10	0.50	396.0	65.1		10	0.50	177.6	66.6		10	0.45	6.3	68.4
	9	0.50	367.5	65.1		9	0.50	164.6	66.6		9	0.48	5.8	68.2
	8	0.50	338.0	65.2		8	0.50	151.0	66.6		8	0.49	5.3	68.1
	7	0.50	307.3	65.3		7	0.50	136.9	66.6		7	0.49	4.8	68.1
	6	0.50	274.9	65.4		6	0.50	122.2	66.6		6	0.49	4.3	68.1
	5	0.50	240.9	65.6		5	0.50	106.8	66.6		5	0.49	3.7	68.1
	4	0.50	204.7	65.6		4	0.50	90.6	66.5		4	0.49	3.1	68.1
	3	0.50	166.0	65.7		3	0.50	73.3	66.5		3	0.50	2.5	68.1
	2	0.50	123.6	65.8		2	0.50	54.3	66.3		2	0.50	1.9	68.1
	1.59	0.50	104.4	65.8		1.59	0.50	45.9	66.2		1.59	0.50	1.6	68.1
	1	0.50	74.4	65.7		1	0.50	32.6	66.0		1	0.50	1.1	68.2
	0.9	0.50	68.9	65.7		0.9	0.50	30.2	65.9		0.9	0.50	1.0	68.2
	0.8	0.50	63.3	65.6		0.8	0.50	27.7	65.8		0.8	0.50	0.9	68.3
	0.7	0.50	57.4	65.6		0.7	0.50	25.1	65.8		0.7	0.50	0.8	68.3
	0.6	0.50	51.3	65.5		0.6	0.50	22.5	65.7		0.6	0.50	0.7	68.3
	0.5	0.50	44.9	65.5		0.5	0.50	19.7	65.6		0.5	0.50	0.6	68.3
	0.4	0.50	38.2	65.4		0.4	0.50	16.7	65.5		0.4	0.50	0.5	68.4
	0.3	0.50	31.0	65.3		0.3	0.50	13.6	65.3		0.3	0.50	0.4	68.4
	0.2	0.50	23.1	65.0		0.2	0.50	10.1	65.2		0.2	0.50	0.3	68.5
	0.1	0.50	14.1	64.7		0.1	0.57	6.0	68.2		0.1	0.51	0.2	68.6
40.0	1.59	0.50	45.9	66.2	58.0	1.59	0.50	21.4	66.4	76.0	1.59	0.50	0.9	69.0
	10	0.50	177.6	66.6		10	0.50	83.5	67.2		10	0.45	3.7	68.6
	9	0.50	164.6	66.6		9	0.50	77.2	67.3		9	0.48	3.4	68.4
	8	0.50	151.0	66.6		8	0.50	70.7	67.3		8	0.49	3.1	68.4
	7	0.50	136.9	66.6		7	0.50	64.0	67.2		7	0.49	2.8	68.5
	6	0.50	122.2	66.6		6	0.50	57.1	67.1		6	0.49	2.5	68.6
	5	0.50	106.8	66.6		5	0.50	49.9	67.1		5	0.49	2.2	68.6
	4	0.50	90.6	66.5		4	0.50	42.2	66.9		4	0.49	1.8	68.7
	3	0.50	73.3	66.5		3	0.50	34.1	66.8		3	0.50	1.5	68.8
	2	0.50	54.3	66.3		2	0.50	25.3	66.5		2	0.50	1.1	68.9
	1.59	0.50	45.9	66.2		1.59	0.50	21.3	66.4		1.59	0.50	0.9	69.0
	1	0.50	32.6	66.0		1	0.50	15.2	66.1		1	0.50	0.6	69.2
	0.9	0.50	30.2	65.9		0.9	0.50	14.0	66.1		0.9	0.50	0.6	69.2
	0.8	0.50	27.7	65.8		0.8	0.50	12.9	66.0		0.8	0.50	0.5	69.3
	0.7	0.50	25.1	65.8		0.7	0.50	11.7	66.0		0.7	0.50	0.5	69.3
	0.6	0.50	22.5	65.7		0.6	0.50	10.4	65.9		0.6	0.50	0.4	69.4
	0.5	0.50	19.7	65.6		0.5	0.50	9.1	65.8		0.5	0.50	0.4	69.4
	0.4	0.50	16.7	65.5		0.4	0.50	7.8	65.7		0.4	0.50	0.3	69.5
	0.3	0.50	13.6	65.3		0.3	0.50	6.3	65.5		0.3	0.50	0.2	69.6
	0.2	0.50	10.1	65.2		0.2	0.50	4.7	65.6		0.2	0.50	0.2	69.7
	0.1	0.57	6.0	68.2		0.1	0.54	2.8	64.8		0.1	0.50	0.1	69.9
46.0	1.59	0.50	21.4	66.4	64.0	1.59	0.50	10.4	66.5	82.0	1.59	0.50	0.5	70.1
	10	0.50	83.5	67.2		10	0.50	41.0	67.8		10	0.45	2.3	68.8
	9	0.50	77.2	67.3		9	0.50	37.9	67.6		9	0.49	2.1	69.2
	8	0.50	70.7	67.3		8	0.50	34.7	67.5		8	0.49	1.9	69.3
	7	0.50	64.0	67.2		7	0.50	31.4	67.4		7	0.49	1.7	69.3
	6	0.50	57.1	67.1		6	0.50	28.0	67.3		6	0.49	1.5	69.4
	5	0.50	49.9	67.1		5	0.50	24.5	67.3		5	0.49	1.3	69.5
	4	0.50	42.2	66.9		4	0.50	20.7	67.1		4	0.49	1.1	69.6
	3	0.50	34.1	66.8		3	0.50	16.7	66.9		3	0.50	0.9	69.8
	2	0.50	25.3	66.5		2	0.50	12.4	66.7		2	0.50	0.7	70.0
	1.59	0.50	21.3	66.4		1.59	0.50	10.5	66.6		1.59	0.50	0.5	70.2
	1	0.50	15.2	66.1		1	0.50	7.4	66.4		1	0.50	0.4	70.5
	0.9	0.50	14.0	66.1		0.9	0.50	6.9	66.4		0.9	0.50	0.3	70.5
	0.8	0.50	12.9	66.0		0.8	0.50	6.3	66.6		0.8	0.50	0.3	70.6
	0.7	0.50	11.7	66.0		0.7	0.50	5.7	66.3		0.7	0.50	0.3	70.7
	0.6	0.50	10.4	65.9		0.6	0.50	5.1	66.5		0.6	0.50	0.3	70.8
	0.5	0.50	9.1	65.8		0.5	0.50	4.5	66.2		0.5	0.50	0.2	70.9
	0.4	0.50	7.8	65.7		0.4	0.50	3.8	66.2		0.4	0.50	0.2	71.1
	0.3	0.50	6.3	65.5		0.3	0.50	3.0	66.1		0.3	0.50	0.1	71.3
	0.2	0.50	4.7	65.6		0.2	0.50	2.3	65.8		0.2	0.50	0.1	71.6
	0.1	0.54	2.8	64.8		0.1	0.51	1.4	66.1		0.1	0.50	0.1	72.1

Tableau A VII. 14 Résultats DSR (diamètre 8 mm) PG 64E-28

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.06	106.8	66.6	16.0	1.59	0.08	1845.7	59.1	-2.0	1.59	0.08	32321.0	40.5
	10	0.08	412.8	65.5		10	0.09	5839.4	53.9		10	0.09	67211.0	33.6
	9	0.09	383.6	65.5		9	0.10	5486.6	54.2		9	0.10	64786.0	33.9
	8	0.09	351.5	65.7		8	0.10	5112.1	54.6		8	0.10	62035.0	34.4
	7	0.08	318.6	65.8		7	0.10	4715.9	55.0		7	0.10	59098.0	34.8
	6	0.09	284.6	65.9		6	0.10	4288.9	55.4		6	0.10	55678.0	35.4
	5	0.08	249.0	66.0		5	0.10	3837.3	55.8		5	0.10	51727.0	36.0
	4	0.08	210.9	66.1		4	0.10	3348.2	56.5		4	0.09	47427.0	36.4
	3	0.08	170.6	66.1		3	0.09	2789.3	57.4		3	0.09	42337.0	37.4
	2	0.08	126.1	66.1		2	0.09	2131.7	58.6		2	0.09	35679.0	39.5
	1.59	0.08	105.9	66.5		1.59	0.09	1847.4	58.6		1.59	0.09	32234.0	39.4
	1	0.06	76.2	65.5		1	0.10	1359.3	60.3		1	0.08	26283.0	41.9
	0.9	0.09	70.2	65.8		0.9	0.10	1268.2	59.8		0.9	0.09	25091.0	41.4
	0.8	0.09	63.7	66.3		0.8	0.10	1169.3	60.1		0.8	0.09	23712.0	41.8
	0.7	0.09	58.3	65.6		0.7	0.10	1073.3	60.5		0.7	0.09	22358.0	42.5
	0.6	0.09	51.4	66.4		0.6	0.02	974.3	56.1		0.6	0.09	20902.0	42.9
	0.5	0.08	45.5	65.3		0.5	0.06	855.4	61.8		0.5	0.08	19123.0	43.1
	0.4	0.08	37.8	66.9		0.4	0.07	714.6	61.0		0.4	0.08	16935.0	44.1
	0.3	0.08	31.0	64.2		0.3	0.05	617.6	59.3		0.3	0.07	14608.0	46.7
	0.2	0.13	23.5	67.6		0.2	0.03	423.9	61.7		0.2	0.07	12147.0	44.6
	0.1	0.12	13.0	66.9		0.1	0.04	416.3	59.7		0.1	0.15	7473.6	51.7
28.0	1.59	0.06	256.1	65.4	10.0	1.59	0.08	5078.4	54.0	-8.0	1.59	0.08	71896.0	33.3
	10	0.08	954.3	62.8		10	0.09	14173.0	47.4		10	0.09	128760.0	26.6
	9	0.09	887.7	63.0		9	0.10	13431.0	47.9		9	0.10	124740.0	26.8
	8	0.09	817.8	63.3		8	0.10	12635.0	48.3		8	0.10	120490.0	27.2
	7	0.08	744.4	63.5		7	0.10	11766.0	48.8		7	0.10	115800.0	27.6
	6	0.09	666.8	63.7		6	0.10	10816.0	49.4		6	0.10	110720.0	28.0
	5	0.08	586.2	63.8		5	0.10	9773.7	49.9		5	0.09	104980.0	28.5
	4	0.08	498.7	64.1		4	0.09	8657.2	50.4		4	0.09	98281.0	29.4
	3	0.08	405.5	64.4		3	0.09	7380.7	51.4		3	0.09	89192.0	30.7
	2	0.08	301.6	64.6		2	0.09	5821.2	53.1		2	0.09	77199.0	31.8
	1.59	0.08	253.6	65.1		1.59	0.09	5076.7	53.1		1.59	0.09	72151.0	32.2
	1	0.06	185.3	64.6		1	0.09	3857.0	55.1		1	0.08	60023.0	34.0
	0.9	0.09	169.6	65.1		0.9	0.10	3618.2	54.8		0.9	0.09	58427.0	34.0
	0.8	0.09	153.7	65.2		0.8	0.09	3354.9	55.2		0.8	0.09	55948.0	34.4
	0.7	0.09	141.5	65.1		0.7	0.10	3099.6	55.8		0.7	0.09	53043.0	34.8
	0.6	0.09	124.1	65.3		0.6	0.10	2822.1	55.8		0.6	0.09	50158.0	35.6
	0.5	0.08	110.7	65.2		0.5	0.11	2491.4	56.3		0.5	0.08	47010.0	36.1
	0.4	0.07	90.5	65.5		0.4	0.11	2184.0	57.4		0.4	0.07	42725.0	36.0
	0.3	0.06	76.8	64.5		0.3	0.10	1814.7	57.0		0.3	0.06	36508.0	37.3
	0.2	0.07	52.0	67.5		0.2	0.09	1385.1	58.6		0.2	0.05	32569.0	38.2
	0.1	0.15	31.3	62.1		0.1	0.09	891.1	59.5		0.1	0.07	23483.0	37.2
22.0	1.59	0.05	668.3	63.3	4.0	1.59	0.08	13210.0	47.6		1.59	0.08		
	10	0.08	2333.7	58.9		10	0.09	31982.0	40.8		10	0.09		
	9	0.09	2179.0	59.4		9	0.10	30577.0	41.1		9	0.10		
	8	0.09	2016.2	59.7		8	0.10	29015.0	41.5		8	0.10		
	7	0.08	1844.5	59.9		7	0.10	27328.0	42.0		7	0.10		
	6	0.09	1669.5	60.2		6	0.10	25412.0	42.6		6	0.10		
	5	0.08	1471.0	60.6		5	0.10	23285.0	43.1		5	0.10		
	4	0.08	1270.0	61.0		4	0.09	20980.0	43.6		4	0.09		
	3	0.08	1035.3	61.5		3	0.09	18302.0	44.7		3	0.09		
	2	0.08	784.9	62.0		2	0.09	14898.0	46.6		2	0.09		
	1.59	0.08	662.9	63.0		1.59	0.09	13230.0	46.6		1.59	0.09		
	1	0.06	489.4	62.7		1	0.08	10364.0	48.9		1	0.08		
	0.9	0.09	448.1	63.3		0.9	0.09	9821.3	48.5		0.9	0.09		
	0.8	0.09	406.2	63.4		0.8	0.09	9191.5	48.9		0.8	0.09		
	0.7	0.09	376.0	63.7		0.7	0.09	8559.9	49.6		0.7	0.09		
	0.6	0.09	332.2	63.7		0.6	0.09	7901.2	49.9		0.6	0.09		
	0.5	0.08	298.4	63.8		0.5	0.09	7104.0	50.0		0.5	0.09		
	0.4	0.08	246.5	63.7		0.4	0.08	6190.6	51.3		0.4	0.08		
	0.3	0.05	208.8	62.7		0.3	0.11	5349.6	52.3		0.3	0.11		
	0.2	0.03	133.5	65.0		0.2	0.12	4037.6	51.9		0.2	0.12		
	0.1	0.09	94.1	62.4		0.1	0.08	2884.0	54.1		0.1	0.08		

Tableau A VII.15 Résultats DSR (diamètre 4 mm) PG 64E-28

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
-4.0	1.59	0.008	57910.0	39.3	-22.0	1.59	0.008	365300.0	19.6
	10	0.008	113810.0	31.4		10	0.009	503590.0	14.0
	9	0.010	110200.0	31.8		9	0.010	496370.0	14.0
	8	0.010	105640.0	32.5		8	0.010	488070.0	14.2
	7	0.010	100480.0	32.9		7	0.010	477970.0	14.8
	6	0.010	95334.0	33.3		6	0.010	464320.0	14.9
	5	0.007	91311.0	34.3		5	0.009	454430.0	15.4
	4	0.008	82609.0	34.8		4	0.009	433790.0	16.3
	3	0.008	72499.0	35.6		3	0.009	415060.0	16.5
	2	0.008	64906.0	37.3		2	0.009	381530.0	18.6
	1.59	0.007	59935.0	37.9		1.59	0.009	369210.0	18.2
	1	0.006	48514.0	41.3		1	0.008	327370.0	19.0
	0.9	0.009	45172.0	39.4		0.9	0.009	326200.0	19.8
	0.8	0.009	41443.0	41.0		0.8	0.009	317750.0	20.3
	0.7	0.009	39570.0	41.4		0.7	0.009	308730.0	20.7
	0.6	0.009	36168.0	40.4		0.6	0.009	298810.0	21.2
	0.5	0.008	32246.0	43.0		0.5	0.008	287230.0	21.6
	0.4	0.007	30500.0	44.4		0.4	0.008	273020.0	22.0
	0.3	0.006	24667.0	37.2		0.3	0.006	254680.0	22.1
	0.2	0.004	15067.0	48.0		0.2	0.005	218260.0	19.0
	0.1	0.003	19086.0	59.8		0.1	0.000	66524.0	90.0
-10.0	1.59	0.005	126460.0	31.9	-28.0	1.59	0.009	502420.0	15.6
	10	0.009	222690.0	24.5		10	0.009	637820.0	10.6
	9	0.010	216710.0	25.0		9	0.010	630280.0	10.4
	8	0.010	210300.0	25.4		8	0.010	624190.0	10.7
	7	0.010	202120.0	26.0		7	0.010	615520.0	11.2
	6	0.010	193310.0	26.2		6	0.010	601220.0	11.5
	5	0.010	184200.0	26.9		5	0.009	589490.0	11.5
	4	0.009	170790.0	27.7		4	0.009	574360.0	12.6
	3	0.009	157760.0	28.4		3	0.009	547180.0	12.7
	2	0.006	135410.0	30.8		2	0.009	523350.0	14.2
	1.59	0.008	126870.0	32.8		1.59	0.009	500170.0	14.0
	1	0.006	111830.0	31.2		1	0.008	457660.0	16.3
	0.9	0.009	105130.0	33.0		0.9	0.009	459820.0	15.7
	0.8	0.009	99085.0	31.9		0.8	0.009	451120.0	16.0
	0.7	0.009	90229.0	33.6		0.7	0.009	441200.0	16.2
	0.6	0.009	86911.0	35.2		0.6	0.008	428750.0	16.4
	0.5	0.008	80176.0	32.3		0.5	0.008	413490.0	16.7
	0.4	0.007	67976.0	34.9		0.4	0.007	393000.0	17.0
	0.3	0.006	64209.0	43.2		0.3	0.006	358170.0	17.1
	0.2	0.002	62528.0	33.0		0.2	0.004	321720.0	19.5
	0.1	0.001	36448.0	-154.6		0.1	0.000	31504.0	44.3
-22.0	1.59	0.008	365300.0	19.6	-34.0	1.59	0.008	639410.0	12.2
	10	0.009	503590.0	14.0		10	0.009	767690.0	7.8
	9	0.010	496370.0	14.0		9	0.010	759080.0	7.8
	8	0.010	488070.0	14.2		8	0.009	753050.0	7.9
	7	0.010	477970.0	14.8		7	0.009	743510.0	8.4
	6	0.010	464320.0	14.9		6	0.009	731850.0	8.4
	5	0.009	454430.0	15.4		5	0.009	723460.0	8.9
	4	0.009	433790.0	16.3		4	0.009	705380.0	9.5
	3	0.009	415060.0	16.5		3	0.009	683220.0	9.5
	2	0.009	381530.0	18.6		2	0.009	660340.0	11.4
	1.59	0.009	369210.0	18.2		1.59	0.009	641720.0	10.7
	1	0.008	327370.0	19.0		1	0.008	588990.0	12.2
	0.9	0.009	326200.0	19.8		0.9	0.009	594660.0	12.3
	0.8	0.009	317750.0	20.3		0.8	0.009	585880.0	12.6
	0.7	0.009	308730.0	20.7		0.7	0.009	576230.0	12.8
	0.6	0.009	298810.0	21.2		0.6	0.008	564810.0	13.1
	0.5	0.008	287230.0	21.6		0.5	0.008	550210.0	13.3
	0.4	0.008	273020.0	22.0		0.4	0.007	531300.0	13.5
	0.3	0.006	254680.0	22.1		0.3	0.006	502590.0	13.3
	0.2	0.005	218260.0	19.0		0.2	0.004	434010.0	10.9
	0.1	0.000	66524.0	90.0		0.1	0.005	363220.0	15.5

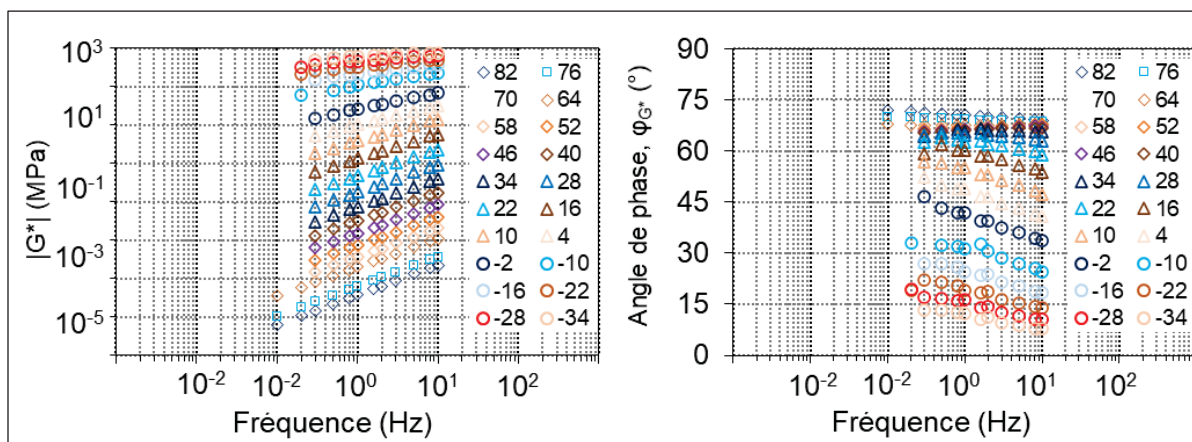


Figure A VII.4 Courbes isothermes PG 64E-28

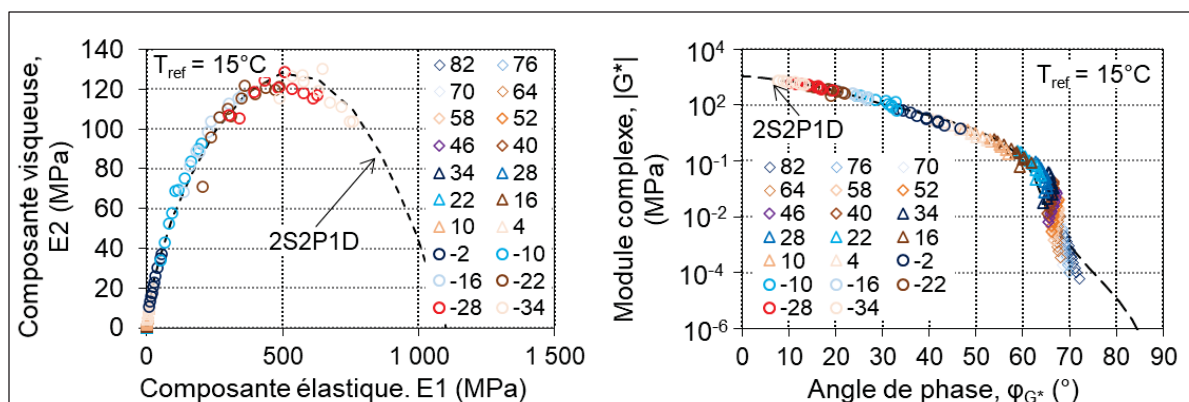


Figure A VII.5 Plans Cole-Cole et black PG 64E-28

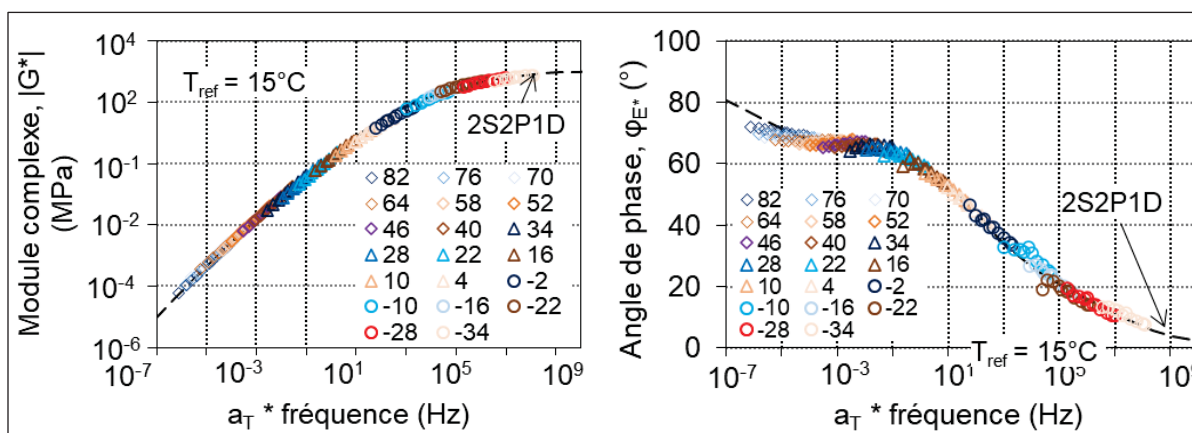


Figure A VII.6 Courbes maîtresses PG 64E-28

Tableau A VII.16 Paramètres 2S2P1D PG 64E-28

2S2P1D ($T_{ref} : 15^{\circ}C$)						
G00 (MPa): 0	G0 (MPa): 1100	k: 0.287	h: 0.700	δ : 5.735	β : 994	C1: 20.7 C2: 191
Temperature ($^{\circ}C$)	82.0	76.0	70.0	64.0	58.0	
Tau	1.60E-10	3.00E-10	5.00E-10	1.20E-09	3.00E-09	
Temperature ($^{\circ}C$)	52.0	46.0	40.0	34.0	28.0	
Tau	7.00E-09	2.00E-08	5.60E-08	1.90E-07	7.60E-07	
Temperature ($^{\circ}C$)	22.0	15.0	10.0	4.0	-2.0	
Tau	3.40E-06	2.00E-05	1.00E-04	6.00E-04	4.00E-03	
Temperature ($^{\circ}C$)	-10.0	-16.0	-22.0	-28.0	-34.0	
Tau	1.00E-01	5.50E-01	2.40E+00	2.00E+01	2.40E+02	

Tableau A VII.17 Résultats DSR (diamètre 25 mm) RAP-1

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	2.90	1303.4	51.3	52.0	1.59	2.96	587.5	55.4	70.0	1.59	3.01	10.2	73.8
	10	1.15	3471.1	44.6		10	2.87	1662.5	51.1		10	3.00	42.7	69.5
	9	1.53	3266.5	45.6		9	2.91	1564.0	51.7		9	3.03	39.3	69.6
	8	1.81	3061.6	46.3		8	2.89	1464.2	52.1		8	3.00	35.9	69.9
	7	1.90	2867.1	46.8		7	2.90	1356.1	52.5		7	3.01	32.4	70.2
	6	2.06	2636.6	47.5		6	2.93	1241.3	53.0		6	3.03	28.8	70.5
	5	2.29	2383.6	48.2		5	2.92	1117.6	53.4		5	3.00	25.0	70.9
	4	2.75	2093.2	49.3		4	2.93	983.0	54.0		4	3.00	21.0	71.5
	3	2.86	1793.8	50.2		3	2.95	830.5	54.7		3	3.01	16.8	72.2
	2	2.90	1432.0	51.2		2	2.96	654.4	55.7		2	3.00	12.1	73.2
	1.59	2.91	1239.6	52.1		1.59	2.97	568.9	56.1		1.59	3.01	10.1	73.8
	1	2.93	952.8	53.5		1	2.97	430.7	56.9		1	2.99	6.9	75.1
	0.9	2.93	901.0	53.6		0.9	2.98	404.3	57.2		0.9	3.00	6.3	75.3
	0.8	2.94	845.6	53.8		0.8	2.97	376.9	57.4		0.8	3.00	5.7	75.6
	0.7	2.94	785.4	54.0		0.7	2.98	347.6	57.8		0.7	3.00	5.1	76.0
	0.6	2.94	719.9	54.2		0.6	2.99	316.6	58.2		0.6	3.00	4.5	76.4
	0.5	2.95	647.8	54.4		0.5	2.97	282.9	58.5		0.5	3.00	3.9	76.9
	0.4	2.97	568.2	55.1		0.4	2.98	246.0	58.9		0.4	3.00	3.2	77.5
40.0	0.3	2.96	481.7	56.0	58.0	0.3	2.99	205.4	59.5	76.0	0.3	3.00	2.5	78.3
	0.2	2.97	377.5	56.6		0.2	2.99	158.6	60.4		0.2	3.00	1.8	79.4
	0	---	---	---		0.1	3.11	100.7	62.0		0.1	2.81	0.9	81.9
	1.59	2.96	587.5	55.4		1.59	2.99	259.0	59.5		1.59	3.01	4.8	76.8
	10	2.87	1662.5	51.1		10	2.94	799.9	55.7		10	3.00	21.6	71.9
	9	2.91	1564.0	51.7		9	2.98	748.3	56.0		9	3.03	19.8	72.4
	8	2.89	1464.2	52.1		8	2.95	696.8	56.3		8	3.00	18.1	72.7
	7	2.90	1356.1	52.5		7	2.96	642.1	56.6		7	3.01	16.2	73.0
	6	2.93	1241.3	53.0		6	2.99	583.6	57.0		6	3.03	14.3	73.4
	5	2.92	1117.6	53.4		5	2.96	522.1	57.4		5	3.00	12.4	73.9
	4	2.93	983.0	54.0		4	2.97	454.5	57.9		4	3.00	10.3	74.4
	3	2.95	830.5	54.7		3	2.98	379.2	58.4		3	3.01	8.1	75.2
	2	2.96	654.4	55.7		2	2.98	293.3	59.6		2	3.00	5.8	76.2
	1.59	2.97	568.9	56.1		1.59	2.99	253.7	59.8		1.59	3.00	4.8	76.8
	1	2.97	430.7	56.9		1	2.97	187.9	60.7		1	3.00	3.2	78.0
	0.9	2.98	404.3	57.2		0.9	3.00	175.8	60.9		0.9	3.00	2.9	78.3
	0.8	2.97	376.9	57.4		0.8	2.99	163.0	61.2		0.8	3.00	2.6	78.6
	0.7	2.98	347.6	57.8		0.7	2.99	149.6	61.4		0.7	3.00	2.3	78.9
46.0	0.6	2.99	316.6	58.2	64.0	0.6	3.00	135.2	61.7	82.0	0.6	3.00	2.1	79.4
	0.5	2.97	282.9	58.5		0.5	2.99	119.8	62.1		0.5	3.00	1.7	79.8
	0.4	2.98	246.0	58.9		0.4	2.99	103.3	62.6		0.4	3.00	1.4	80.4
	0.3	2.99	205.4	59.5		0.3	3.00	85.1	63.3		0.3	3.00	1.1	81.2
	0.2	2.99	158.6	60.4		0.2	3.01	64.5	64.3		0.2	2.98	0.8	82.1
	0.1	3.11	100.7	62.0		0.1	2.96	39.6	66.0		0.1	1.59	0.4	83.5
	1.59	2.99	259.0	59.5		1.59	3.01	113.1	63.3		1.59	3.01	2.4	79.5
	10	2.94	799.9	55.7		10	2.98	378.4	59.3		10	3.00	11.3	74.6
	9	2.98	748.3	56.0		9	3.01	352.5	59.8		9	3.03	10.3	75.1
	8	2.95	696.8	56.3		8	2.98	326.5	60.0		8	3.00	9.4	75.4
	7	2.96	642.1	56.6		7	2.99	299.2	60.3		7	3.01	8.4	75.7
	6	2.99	583.6	57.0		6	3.01	270.4	60.6		6	3.03	7.4	76.1
	5	2.96	522.1	57.4		5	2.98	240.1	60.9		5	3.00	6.3	76.7
	4	2.97	454.5	57.9		4	2.99	207.1	61.4		4	3.00	5.2	77.2
	3	2.98	379.2	58.4		3	3.00	171.1	62.0		3	3.01	4.1	77.9
	2	2.98	293.3	59.6		2	2.99	130.5	62.8		2	3.00	2.9	78.9
	1.59	2.99	253.7	59.8		1.59	3.00	111.6	63.4		1.59	3.01	2.4	79.5
	1	2.97	187.9	60.7		1	3.00	81.2	64.4		1	3.00	1.6	80.7
	0.9	3.00	175.8	60.9		0.9	3.00	75.5	64.6		0.9	3.00	1.4	80.9
	0.8	2.99	163.0	61.2		0.8	3.00	69.6	64.8		0.8	3.00	1.3	81.2
	0.7	2.99	149.6	61.4		0.7	3.00	63.4	65.1		0.7	3.00	1.1	81.5
	0.6	3.00	135.2	61.7		0.6	3.00	56.9	65.5		0.6	3.02	1.0	81.9
	0.5	2.99	119.8	62.1		0.5	3.00	50.0	65.9		0.5	3.02	0.8	82.3
	0.4	2.99	103.3	62.6		0.4	3.00	42.6	66.5		0.4	3.01	0.7	82.8
	0.3	3.00	85.1	63.3		0.3	3.01	34.6	67.2		0.3	2.98	0.5	83.4
	0.2	3.01	64.5	64.3		0.2	3.01	25.7	68.3		0.2	3.01	0.4	84.4
	0.1	2.96	39.6	66.0		0.1	3.00	15.2	70.3		0.1	3.62	0.2	85.5

Tableau A VII.18 Résultats DSR (diamètre 8 mm) RAP-1

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	1.00	1899.4	49.9	16.0	1.59	1.00	17558.4	35.7	-2.0	1.59	0.98	102365.3	23.7
	10	1.00	4918.6	45.8		10	0.99	33811.0	32.2		10	0.92	158856.7	21.0
	9	1.01	4644.5	46.2		9	1.00	32457.2	32.7		9	0.98	155339.6	21.2
	8	1.00	4375.3	46.5		8	0.99	31155.3	33.0		8	0.97	151957.7	21.4
	7	1.00	4089.0	46.8		7	1.00	29722.8	33.3		7	0.97	147689.8	21.7
	6	1.01	3780.6	47.2		6	1.01	28141.9	33.6		6	0.98	142579.9	22.0
	5	1.00	3445.8	47.6		5	0.99	26398.8	33.9		5	0.97	136768.3	22.3
	4	1.00	3071.6	48.1		4	1.00	24357.2	34.3		4	0.97	129719.6	22.6
	3	1.00	2643.3	48.7		3	1.00	21935.9	34.9		3	0.98	120868.7	23.1
	2	1.00	2130.8	49.6		2	1.00	18863.7	35.8		2	0.98	109043.0	23.5
	1.59	1.00	1883.3	50.1		1.59	1.00	17313.7	36.2		1.59	0.98	102398.2	24.0
	1	1.00	1459.2	51.1		1	1.00	14486.9	37.0		1	0.98	90716.5	24.9
	0.9	1.00	1377.5	51.3		0.9	1.00	13914.6	37.3		0.9	0.98	88422.9	25.0
	0.8	1.00	1290.7	51.6		0.8	1.00	13297.2	37.5		0.8	0.98	85639.3	25.2
	0.7	1.00	1198.0	51.9		0.7	1.00	12621.7	37.8		0.7	0.98	82553.9	25.5
	0.6	1.00	1098.3	52.2		0.6	1.00	11878.0	38.1		0.6	0.98	79131.6	25.8
	0.5	1.00	990.2	52.6		0.5	1.00	11045.2	38.4		0.5	0.98	75196.2	26.1
	0.4	1.00	871.3	53.1		0.4	1.00	10092.5	38.9		0.4	0.99	70594.5	26.5
	0.3	1.00	737.3	53.8		0.3	1.00	8968.3	39.5		0.3	0.99	64971.9	26.9
	0.2	1.00	580.2	54.7		0.2	1.00	7562.0	40.4		0.2	0.99	57583.7	27.6
	0.1	1.00	380.6	56.3		0.1	1.00	5582.8	42.0		0.1	0.99	46610.4	28.8
28.0	1.59	1.00	4165.3	45.2	10.0	1.59	1.00	33420.8	31.3	-8.0	1.59	0.97	165305.0	20.3
	10	1.00	9694.3	41.0		10	0.99	59325.7	28.2		10	0.54	243820.3	17.1
	9	1.01	9202.5	41.6		9	1.00	57372.6	28.6		9	0.68	238874.0	17.3
	8	1.00	8725.4	41.9		8	0.99	55407.8	28.8		8	0.69	234696.6	17.5
	7	1.00	8213.5	42.2		7	0.99	53215.8	29.1		7	0.71	229335.2	17.8
	6	1.01	7657.5	42.6		6	1.00	50736.6	29.4		6	0.74	222628.2	18.1
	5	1.00	7050.7	42.9		5	0.99	47981.6	29.7		5	0.76	215020.7	18.4
	4	1.00	6364.2	43.4		4	0.99	44717.2	30.1		4	0.80	205311.7	18.8
	3	1.00	5564.5	44.1		3	0.99	40772.9	30.6		3	0.88	193024.5	19.3
	2	1.00	4590.2	45.0		2	0.99	35659.9	31.6		2	0.76	177755.4	19.7
	1.59	1.00	4110.6	45.4		1.59	1.00	33107.4	31.9		1.59	0.89	167515.7	20.2
	1	1.00	3271.0	46.5		1	0.99	28304.4	32.6		1	0.97	150516.2	21.1
	0.9	1.00	3106.9	46.7		0.9	1.00	27286.0	32.8		0.9	0.97	147887.3	21.5
	0.8	1.00	2930.7	46.9		0.8	0.99	26214.1	33.0		0.8	0.97	143773.8	21.6
	0.7	1.00	2741.2	47.2		0.7	1.00	25033.8	33.3		0.7	0.97	139171.2	21.8
	0.6	1.00	2535.0	47.6		0.6	1.00	23724.5	33.6		0.6	0.97	133866.8	22.1
	0.5	1.00	2308.8	48.0		0.5	1.00	22249.7	33.9		0.5	0.97	127647.2	22.4
	0.4	1.00	2056.7	48.5		0.4	1.00	20543.6	34.3		0.4	0.97	120216.7	22.9
	0.3	1.00	1768.3	49.1		0.3	1.00	18503.9	34.9		0.3	0.98	111330.3	23.6
	0.2	1.00	1423.5	50.1		0.2	1.00	15920.5	35.7		0.2	0.98	99798.4	24.2
	0.1	1.00	970.3	51.7		0.1	1.00	12185.3	37.2		0.1	0.99	82084.8	25.5
22.0	1.59	1.00	8751.5	40.3	4.0	1.59	0.99	59934.5	27.3					
	10	1.00	18422.6	36.9		10	0.98	99009.2	24.5					
	9	1.01	17584.5	37.1		9	0.99	96440.1	24.8					
	8	1.00	16776.5	37.4		8	0.98	93693.1	25.1					
	7	1.00	15898.1	37.7		7	0.98	90532.4	25.3					
	6	1.01	14941.7	38.0		6	0.99	86866.0	25.6					
	5	1.00	13890.7	38.4		5	0.98	82771.9	26.0					
	4	1.00	12686.6	38.8		4	0.98	77845.0	26.3					
	3	1.00	11266.9	39.4		3	0.99	71791.6	26.7					
	2	1.00	9502.0	40.3		2	0.99	63765.1	27.5					
	1.59	1.00	8620.1	40.7		1.59	0.99	59588.3	27.9					
	1	1.00	7044.5	41.7		1	0.99	52001.3	28.6					
	0.9	1.00	6730.3	41.9		0.9	0.99	50293.4	28.8					
	0.8	1.00	6391.7	42.2		0.8	0.99	48540.4	29.0					
	0.7	1.00	6024.0	42.5		0.7	0.99	46606.3	29.2					
	0.6	1.00	5622.2	42.8		0.6	0.99	44444.9	29.5					
	0.5	1.00	5176.6	43.2		0.5	0.99	41984.0	29.8					
	0.4	1.00	4672.2	43.7		0.4	0.99	39102.3	30.2					
	0.3	1.00	4084.2	44.4		0.3	0.99	35622.2	30.7					
	0.2	1.00	3365.4	45.3		0.2	0.99	31142.7	31.5					
	0.1	1.00	2388.4	47.0		0.1	0.99	24599.9	32.9					

Tableau A VII.19 Résultats DSR (diamètre 4 mm) RAP-1

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
-2.0	1.59	0.010	122712.7	23.1	-20.0	1.59	0.010	460280.8	12.2
	10	0.010	192020.2	20.1		10	0.010	575391.7	9.7
	9	0.010	188239.4	20.2		9	0.010	568551.0	9.7
	8	0.010	184187.0	20.6		8	0.010	562755.7	9.9
	7	0.010	179447.7	20.7		7	0.010	555343.0	10.1
	6	0.010	173931.5	20.8		6	0.010	546329.9	10.3
	5	0.010	167460.0	21.2		5	0.010	535864.6	10.5
	4	0.010	159469.5	21.4		4	0.010	522696.1	10.8
	3	0.010	149499.3	21.8		3	0.010	505512.6	11.2
	2	0.010	135923.9	22.4		2	0.010	480995.2	11.7
	1.59	0.010	128974.2	22.8		1.59	0.010	466753.1	12.0
	1	0.010	115174.1	23.5		1	0.010	439082.8	12.7
	0.9	0.010	112699.4	23.6		0.9	0.010	433419.2	12.8
	0.8	0.010	109846.7	23.7		0.8	0.010	427015.6	13.0
	0.7	0.010	106613.2	23.9		0.7	0.010	419930.3	13.1
	0.6	0.010	102939.9	24.1		0.6	0.010	411815.1	13.3
	0.5	0.010	98098.1	24.3		0.5	0.010	401826.5	13.6
	0.4	0.010	92956.6	24.7		0.4	0.010	389429.5	14.0
	0.3	0.010	85019.6	24.6		0.3	0.010	373759.0	14.4
	0.2	0.010	77932.6	25.8		0.2	0.010	352038.2	15.0
	0.1	0.010	66680.5	27.2		0.1	0.010	313971.1	15.6
-8.0	1.59	0.010	211353.9	19.1	-26.0	1.59	0.010	585414.8	9.8
	10	0.010	302251.1	16.0		10	0.010	697824.7	7.5
	9	0.010	297073.3	16.1		9	0.010	690632.7	7.6
	8	0.010	291231.8	16.3		8	0.010	685039.7	7.7
	7	0.010	284613.4	16.5		7	0.010	677694.4	7.9
	6	0.010	276881.3	16.7		6	0.010	668852.1	8.1
	5	0.010	267901.3	17.0		5	0.010	658607.4	8.3
	4	0.010	256984.9	17.3		4	0.010	645583.6	8.5
	3	0.010	243124.4	17.7		3	0.010	628373.1	8.9
	2	0.010	224421.5	18.4		2	0.010	604773.5	9.3
	1.59	0.010	214235.1	18.6		1.59	0.010	589603.8	9.6
	1	0.010	194681.2	19.3		1	0.010	559789.7	10.3
	0.9	0.010	190627.0	19.4		0.9	0.010	553912.6	10.4
	0.8	0.010	186120.3	19.6		0.8	0.010	547106.6	10.6
	0.7	0.010	180984.1	19.8		0.7	0.010	539232.9	10.8
	0.6	0.010	175214.9	20.0		0.6	0.010	530306.4	10.9
	0.5	0.010	168537.4	20.3		0.5	0.010	518692.3	11.2
	0.4	0.010	160478.1	20.5		0.4	0.010	506109.3	11.5
	0.3	0.010	150353.5	20.9		0.3	0.010	488837.8	11.8
	0.2	0.010	136936.9	21.5		0.2	0.010	464260.2	12.3
	0.1	0.010	114007.0	22.1		0.1	0.010	422319.5	13.4
-14.0	1.59	0.010	340007.0	15.2	-32.0	1.59	0.010	703540.6	7.7
	10	0.010	449702.7	12.5		10	0.010	806242.0	5.8
	9	0.010	444613.2	12.7		9	0.010	799614.9	5.8
	8	0.010	437572.6	12.9		8	0.010	794828.5	5.9
	7	0.010	429918.8	13.0		7	0.010	788216.2	6.1
	6	0.010	420711.5	13.3		6	0.010	780180.1	6.2
	5	0.010	410007.3	13.5		5	0.010	771061.8	6.4
	4	0.010	396380.8	13.8		4	0.010	759408.8	6.6
	3	0.010	379487.2	14.2		3	0.010	744020.8	7.0
	2	0.010	355961.7	14.9		2	0.010	722823.3	7.2
	1.59	0.010	342915.5	15.1		1.59	0.010	707545.0	7.5
	1	0.010	317339.0	15.8		1	0.010	678610.4	8.2
	0.9	0.010	311627.8	15.9		0.9	0.010	673527.8	8.3
	0.8	0.010	305620.2	16.1		0.8	0.010	666611.1	8.4
	0.7	0.010	298955.3	16.3		0.7	0.010	659473.7	8.6
	0.6	0.010	291220.0	16.4		0.6	0.010	650329.7	8.8
	0.5	0.010	282041.4	16.7		0.5	0.010	639897.1	9.0
	0.4	0.010	270833.9	17.0		0.4	0.010	625723.0	9.3
	0.3	0.010	256853.7	17.5		0.3	0.010	608154.2	9.7
	0.2	0.010	237633.5	17.9		0.2	0.010	583213.4	10.2
	0.1	0.010	206552.3	19.0		0.1	0.010	538844.2	10.9

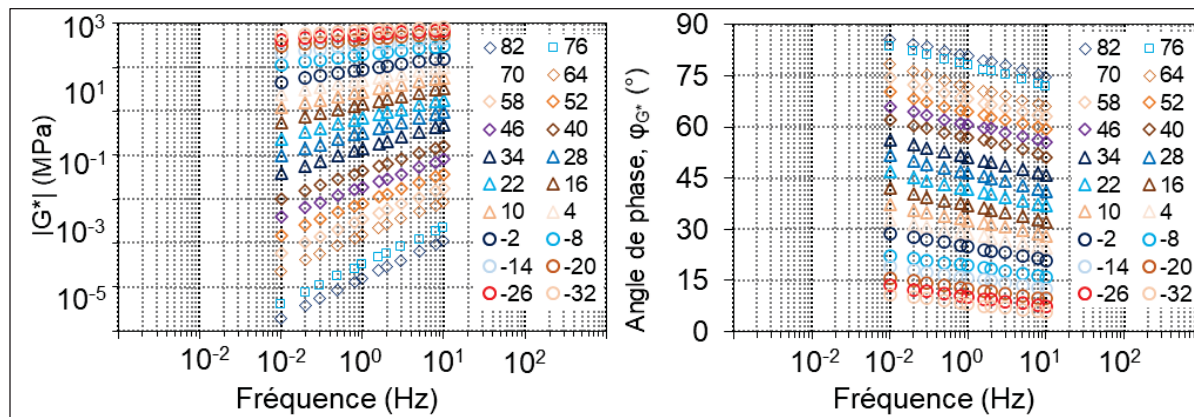


Figure A VII.7 Courbes isothermes RAP-1

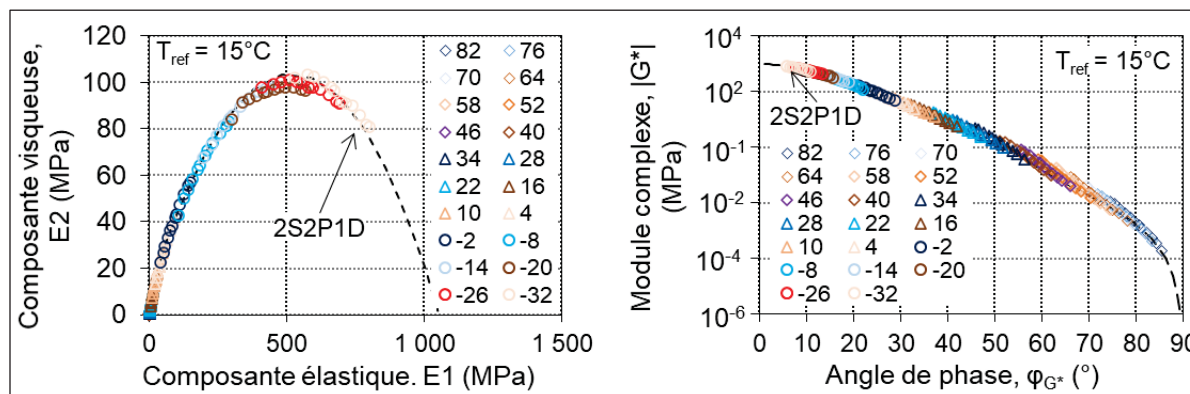


Figure A VII.8 Plans Cole-Cole et black RAP-1

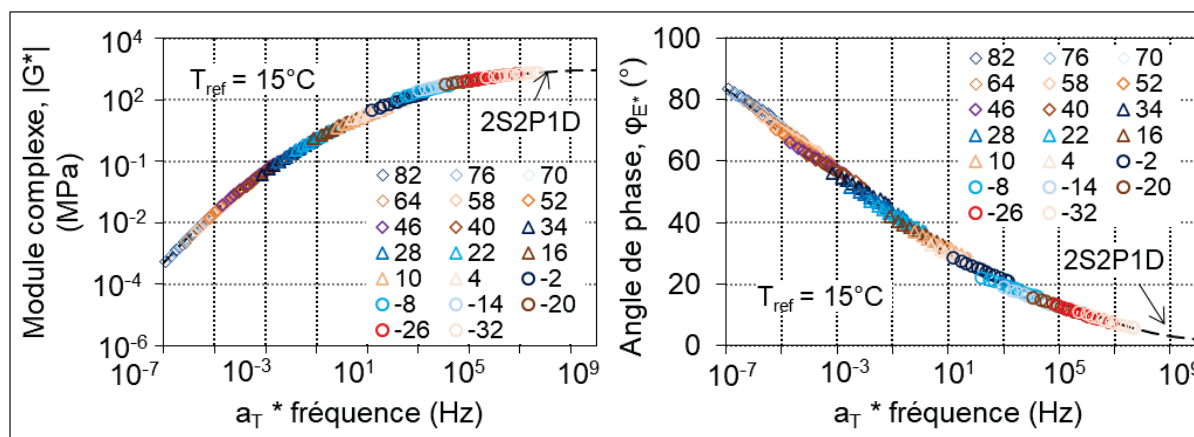


Figure A VII.9 Courbes maîtresses RAP-1

Tableau A VII.20 Paramètres 2S2P1D RAP-1

2S2P1D ($T_{ref} : 15^{\circ}C$)						
G00 (MPa): 0	G0 (MPa): 1055	k: 0.245	h: 0.603	δ : 7.500	β : 1132	C1: 33.4 C2: 273
Temperature ($^{\circ}C$)	82.0	76.0	70.0	64.0	58.0	
Tau	3.20E-10	7.20E-10	2.00E-09	5.60E-09	1.60E-08	
Temperature ($^{\circ}C$)	52.0	46.0	40.0	34.0	28.0	
Tau	4.80E-08	1.60E-07	7.20E-07	5.60E-06	2.40E-05	
Temperature ($^{\circ}C$)	22.0	15.0	10.0	4.0	-2.0	
Tau	1.20E-04	8.00E-04	4.80E-03	2.00E-02	1.20E-01	
Temperature ($^{\circ}C$)	-8.0	-14.0	-20.0	-26.0	-32.0	
Tau	1.28E+00	8.00E+00	9.20E+01	6.40E+02	4.00E+03	

Tableau A VII.21 Résultats DSR (diamètre 25 mm) RAP-2

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	1.92	2859.0	46.4	52.0	1.59	2.36	1275.8	52.1	70.0	1.59	2.44	22.9	70.6
	10	0.77	6930.4	38.6		10	1.40	3475.8	45.9		10	2.43	90.5	66.6
	9	0.82	6677.1	38.9		9	1.51	3318.0	46.5		9	2.46	83.8	66.6
	8	0.85	6348.1	39.4		8	1.71	3108.4	47.2		8	2.43	76.9	66.9
	7	0.90	5983.1	40.1		7	1.94	2891.4	48.0		7	2.44	69.8	67.2
	6	0.96	5577.3	40.9		6	1.86	2664.8	48.5		6	2.46	62.3	67.5
	5	1.09	5119.6	41.7		5	2.28	2393.1	49.5		5	2.44	54.5	67.9
	4	1.17	4603.2	42.7		4	2.30	2118.3	50.2		4	2.44	46.1	68.4
	3	1.24	4003.7	44.2		3	2.33	1799.4	51.0		3	2.44	37.1	69.1
	2	1.54	3247.0	45.4		2	2.35	1435.8	51.8		2	2.44	27.3	70.1
	1.59	1.87	2854.1	46.4		1.59	2.37	1240.7	52.6		1.59	2.44	22.8	70.7
	1	2.29	2219.4	48.4		1	2.39	950.6	54.4		1	2.44	15.9	71.9
	0.9	2.30	2103.2	49.0		0.9	2.38	891.4	54.3		0.9	2.44	14.6	72.2
	0.8	2.31	1964.0	49.3		0.8	2.39	831.6	54.4		0.8	2.44	13.3	72.5
	0.7	2.32	1820.6	49.8		0.7	2.39	768.5	54.7		0.7	2.43	11.9	72.9
	0.6	2.33	1664.6	50.3		0.6	2.39	703.0	55.1		0.6	2.44	10.5	73.3
	0.5	2.34	1493.6	50.9		0.5	2.41	633.9	55.6		0.5	2.44	9.1	73.8
	0.4	2.34	1305.5	52.0		0.4	2.42	557.5	56.0		0.4	2.44	7.6	74.4
40.0	0.3	2.37	1111.5	52.8	58.0	0.3	2.41	466.4	56.6	76.0	0.3	2.44	6.0	75.2
	0.2	2.37	893.3	52.8		0.2	2.42	363.5	57.6		0.2	2.44	4.3	76.3
	0.1	---	---	---		0.1	2.44	236.8	58.9		0.1	2.44	2.3	78.3
	1.59	2.36	1275.8	52.1		1.59	2.41	570.7	56.4		1.59	2.44	10.9	73.7
	10	1.40	3475.8	45.9		10	2.33	1677.2	51.9		10	2.44	45.8	69.4
	9	1.51	3318.0	46.5		9	2.36	1580.5	52.5		9	2.46	42.3	69.4
	8	1.71	3108.4	47.2		8	2.35	1478.3	52.8		8	2.44	38.7	69.7
	7	1.94	2891.4	48.0		7	2.36	1367.5	53.3		7	2.44	34.9	70.0
	6	1.86	2664.8	48.5		6	2.39	1248.6	53.7		6	2.46	31.0	70.4
	5	2.28	2393.1	49.5		5	2.37	1121.4	54.2		5	2.44	26.9	70.8
	4	2.30	2118.3	50.2		4	2.38	981.6	54.8		4	2.44	22.6	71.4
	3	2.33	1799.4	51.0		3	2.40	825.7	55.4		3	2.44	18.0	72.1
	2	2.35	1435.8	51.8		2	2.40	642.0	56.6		2	2.44	13.0	73.2
	1.59	2.37	1240.7	52.6		1.59	2.42	558.2	57.2		1.59	2.44	10.8	73.8
	1	2.39	950.6	54.4		1	2.41	418.2	57.9		1	2.43	7.4	75.0
	0.9	2.38	891.4	54.3		0.9	2.42	393.0	58.1		0.9	2.44	6.8	75.3
	0.8	2.39	831.6	54.4		0.8	2.42	366.0	58.4		0.8	2.44	6.1	75.6
	0.7	2.39	768.5	54.7		0.7	2.42	336.8	58.6		0.7	2.44	5.5	76.0
46.0	0.6	2.39	703.0	55.1	64.0	0.6	2.43	305.3	58.9	82.0	0.6	2.44	4.8	76.4
	0.5	2.41	633.9	55.6		0.5	2.42	271.7	59.4		0.5	2.44	4.1	76.9
	0.4	2.42	557.5	56.0		0.4	2.43	235.8	59.8		0.4	2.44	3.4	77.5
	0.3	2.41	466.4	56.6		0.3	2.43	195.8	60.5		0.3	2.44	2.7	78.2
	0.2	2.42	363.5	57.6		0.2	2.43	150.1	61.4		0.2	2.44	1.9	79.3
	0.1	2.44	236.8	58.9		0.1	2.55	94.1	63.2		0.1	2.29	1.0	80.9
	1.59	2.41	570.7	56.4		1.59	2.43	251.4	60.4		1.59	2.44	5.3	76.5
	10	2.33	1677.2	51.9		10	2.39	801.1	56.2		10	2.43	23.8	71.8
	9	2.36	1580.5	52.5		9	2.42	750.5	56.7		9	2.46	21.8	72.1
	8	2.35	1478.3	52.8		8	2.40	698.1	57.0		8	2.44	19.9	72.4
	7	2.36	1367.5	53.3		7	2.41	642.2	57.3		7	2.44	17.8	72.7
	6	2.39	1248.6	53.7		6	2.43	582.7	57.7		6	2.46	15.8	73.1
	5	2.37	1121.4	54.2		5	2.41	519.8	58.1		5	2.44	13.6	73.5
	4	2.38	981.6	54.8		4	2.41	450.9	58.6		4	2.44	11.3	74.1
	3	2.40	825.7	55.4		3	2.42	375.2	59.2		3	2.44	8.9	74.9
	2	2.40	642.0	56.6		2	2.42	287.9	60.3		2	2.44	6.4	76.0
	1.59	2.42	558.2	57.2		1.59	2.43	248.4	60.5		1.59	2.44	5.2	76.6
	1	2.41	418.2	57.9		1	2.43	183.1	61.5		1	2.44	3.5	77.8
46.0	0.9	2.42	393.0	58.1	64.0	0.9	2.43	170.8	61.7	82.0	0.9	2.44	3.2	78.0
	0.8	2.42	366.0	58.4		0.8	2.43	158.0	62.0		0.8	2.44	2.9	78.3
	0.7	2.42	336.8	58.6		0.7	2.43	144.6	62.2		0.7	2.44	2.6	78.7
	0.6	2.43	305.3	58.9		0.6	2.44	130.5	62.6		0.6	2.44	2.3	79.1
	0.5	2.42	271.7	59.4		0.5	2.43	115.3	63.0		0.5	2.44	1.9	79.5
	0.4	2.43	235.8	59.8		0.4	2.43	99.0	63.5		0.4	2.44	1.6	80.1
	0.3	2.43	195.8	60.5		0.3	2.44	81.2	64.2		0.3	2.50	1.2	80.7
	0.2	2.43	150.1	61.4		0.2	2.45	61.1	65.2		0.2	2.43	0.8	81.8
	0.1	2.55	94.1	63.2		0.1	2.43	37.1	67.1		0.1	1.47	0.4	82.9

Tableau A VII.22 Résultats DSR (diamètre 8 mm) RAP-2

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	1.00	3489.0	48.6	16.0	1.59	1.00	29109.9	34.3	-2.0	1.59	0.97	149881.1	22.2
	10	1.00	8687.5	44.2		10	0.99	54197.9	30.9		10	0.55	228185.1	18.6
	9	1.01	8215.1	44.7		9	1.00	52204.9	31.0		9	0.75	222487.0	18.8
	8	1.00	7761.9	45.0		8	0.99	50276.3	31.4		8	0.76	218310.9	19.1
	7	1.00	7278.0	45.4		7	0.99	48125.3	31.7		7	0.77	212777.8	19.4
	6	1.01	6754.5	45.8		6	1.00	45717.0	32.0		6	0.78	206260.1	19.7
	5	1.00	6185.8	46.2		5	0.99	43046.9	32.5		5	0.86	198003.8	20.1
	4	1.00	5543.5	46.7		4	0.99	39899.5	32.9		4	0.84	189011.7	20.5
	3	1.00	4802.4	47.4		3	1.00	36125.8	33.5		3	0.97	176379.5	21.2
	2	1.00	3907.0	48.3		2	0.99	31230.3	34.6		2	0.94	160684.0	21.9
	1.59	1.00	3473.1	48.8		1.59	1.00	28832.0	35.0		1.59	0.95	151747.6	22.3
	1	1.00	2719.0	49.9		1	0.99	24324.3	35.8		1	0.97	134964.9	23.3
	0.9	1.00	2575.5	50.1		0.9	1.00	23406.7	36.1		0.9	0.97	132200.8	23.5
	0.8	1.00	2421.6	50.3		0.8	1.00	22423.7	36.3		0.8	0.97	128198.8	23.7
	0.7	1.00	2255.7	50.6		0.7	1.00	21338.1	36.6		0.7	0.98	123752.3	24.0
	0.6	1.00	2076.5	51.0		0.6	1.00	20136.8	36.9		0.6	0.98	118703.7	24.4
	0.5	1.00	1881.0	51.4		0.5	1.00	18789.6	37.3		0.5	0.98	112945.5	24.8
	0.4	1.00	1664.1	51.9		0.4	1.00	17234.6	37.8		0.4	0.98	106241.5	25.4
28.0	0.3	1.00	1417.8	52.5	10.0	0.3	1.00	15387.7	38.5	-8.0	0.3	0.98	98066.7	26.0
	0.2	1.00	1126.1	53.4		0.2	1.00	13066.7	39.4		0.2	0.98	87343.7	26.6
	0.1	1.00	749.6	55.0		0.1	1.00	9749.1	41.1		0.1	0.99	70943.0	28.1
	1.59	1.00	7480.9	43.7		1.59	0.99	53382.3	29.8		1.59	0.59	225871.5	19.0
	10	1.00	16747.7	39.6		10	0.98	91632.4	26.5		10	0.41	321509.2	15.1
	9	1.01	15908.3	40.0		9	0.99	88973.1	26.9		9	0.50	316119.7	15.2
	8	1.00	15117.5	40.4		8	0.98	86233.8	27.2		8	0.52	311928.4	15.5
	7	1.00	14268.2	40.7		7	0.99	83083.5	27.4		7	0.53	306154.0	15.7
	6	1.01	13347.0	41.1		6	0.99	79482.5	27.8		6	0.57	298694.2	16.0
	5	1.00	12338.5	41.6		5	0.99	75480.7	28.1		5	0.52	289790.8	16.3
	4	1.00	11193.4	42.0		4	0.99	70649.6	28.6		4	0.51	278094.1	16.6
	3	1.00	9849.5	42.7		3	0.99	64759.5	29.2		3	0.49	265508.8	17.1
	2	1.00	8193.9	43.6		2	0.99	56993.3	30.2		2	0.59	243680.5	17.8
	1.59	1.00	7377.3	44.1		1.59	0.99	53116.0	30.5		1.59	0.64	233673.7	18.4
	1	1.00	5929.8	45.2		1	0.99	45757.3	31.4		1	0.69	211703.5	19.3
	0.9	1.00	5647.2	45.4		0.9	0.99	44198.8	31.6		0.9	0.72	208391.5	19.4
	0.8	1.00	5343.4	45.7		0.8	0.99	42559.5	31.8		0.8	0.73	203527.1	19.5
	0.7	1.00	5015.7	46.0		0.7	0.99	40741.4	32.1		0.7	0.87	197848.3	20.0
22.0	0.6	1.00	4658.3	46.3	4.0	0.6	0.99	38701.8	32.4		0.6	0.85	190867.0	20.5
	0.5	1.00	4261.9	46.8		0.5	0.99	36385.0	32.8		0.5	0.92	182951.3	20.9
	0.4	1.00	3815.3	47.3		0.4	0.99	33703.9	33.3		0.4	0.96	173374.7	21.4
	0.3	1.00	3299.4	48.0		0.3	0.99	30473.2	33.9		0.3	0.87	161654.2	22.1
	0.2	1.00	2678.1	48.9		0.2	1.00	26353.7	34.8		0.2	0.97	145380.4	23.1
	0.1	1.00	1849.2	50.6		0.1	1.00	20363.4	36.4		0.1	0.98	121093.7	24.7
	1.59	1.00	15043.5	39.1		1.59	0.98	92048.5	25.9					
	10	0.99	30626.0	35.3		10	0.96	147234.1	22.6					
	9	1.00	29283.8	35.5		9	0.98	143820.5	23.0					
	8	0.99	28013.7	35.8		8	0.97	140313.5	23.2					
	7	1.00	26628.2	36.1		7	0.97	136053.8	23.5					
	6	1.01	25107.1	36.5		6	0.98	130973.7	23.9					
	5	1.00	23431.7	36.9		5	0.97	125336.8	24.2					
	4	1.00	21486.9	37.4		4	0.98	118330.8	24.6					
	3	1.00	19192.7	38.1		3	0.98	109824.1	25.2					
	2	1.00	16298.3	39.0		2	0.98	97962.7	25.8					
	1.59	1.00	14855.4	39.5		1.59	0.98	91919.5	26.4					
	1	1.00	12241.1	40.5		1	0.98	80649.3	27.3					
	0.9	1.00	11730.1	40.8		0.9	0.98	78381.5	27.5					
	0.8	1.00	11174.5	41.0		0.8	0.98	75795.2	27.8					
	0.7	1.00	10565.7	41.3		0.7	0.99	72915.8	28.1					
	0.6	1.00	9896.3	41.6		0.6	0.99	69693.1	28.4					
	0.5	1.00	9153.1	42.1		0.5	0.99	65999.7	28.7					
	0.4	1.00	8303.0	42.6		0.4	0.99	61638.7	29.1					
	0.3	1.00	7301.3	43.2		0.3	0.99	56329.0	29.7					
	0.2	1.00	6064.2	44.2		0.2	0.99	49474.3	30.5					
	0.1	1.00	4359.2	45.9		0.1	0.99	39332.9	32.0					

Tableau A VII.23 Résultats DSR (diamètre 4 mm) RAP-2

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
0.0	1.59	0.080	155230.0	23.5	-18.0	1.59	0.078	583400.4	11.3
	10	0.079	240762.6	20.1		10	0.078	711170.9	8.9
	9	0.080	235460.0	20.2		9	0.079	704992.3	8.9
	8	0.079	229775.4	20.4		8	0.078	697481.8	9.0
	7	0.079	223314.0	20.7		7	0.078	689286.4	9.3
	6	0.080	215833.1	20.9		6	0.079	678984.3	9.5
	5	0.079	207194.7	21.2		5	0.078	666847.2	9.7
	4	0.079	196852.1	21.7		4	0.078	651504.8	10.0
	3	0.080	183852.2	22.2		3	0.078	631226.4	10.4
	2	0.080	166427.5	23.0		2	0.078	602776.2	10.9
	1.59	0.080	157228.8	23.4		1.59	0.078	586052.4	11.2
	1	0.080	139417.6	24.3		1	0.078	552875.6	11.9
	0.9	0.080	135732.4	24.5		0.9	0.079	545455.0	12.1
	0.8	0.080	131695.7	24.7		0.8	0.078	537021.3	12.2
	0.7	0.080	127186.8	25.0		0.7	0.079	527418.5	12.4
	0.6	0.080	122124.9	25.3		0.6	0.079	516515.7	12.7
	0.5	0.080	116257.1	25.7		0.5	0.079	503694.1	13.0
	0.4	0.080	109350.4	26.2		0.4	0.079	488248.3	13.3
	0.3	0.080	100867.4	26.8		0.3	0.079	468262.6	13.7
	0.2	0.080	89684.5	27.7		0.2	0.079	440459.5	14.4
	0.1	0.080	72459.0	29.3		0.1	0.079	394113.0	15.5
-6.0	1.59	0.079	262811.1	18.9	-24.0	1.59	0.078	740222.4	8.7
	10	0.079	372483.6	15.7		10	0.078	859269.0	6.6
	9	0.080	365737.9	16.0		9	0.078	852948.0	6.6
	8	0.079	358654.9	16.2		8	0.077	846373.5	6.7
	7	0.079	350349.4	16.4		7	0.078	839015.2	6.9
	6	0.080	340981.7	16.7		6	0.079	830240.6	7.1
	5	0.079	330013.5	17.0		5	0.078	819885.1	7.2
	4	0.079	316460.6	17.3		4	0.078	806239.9	7.5
	3	0.079	299448.5	17.8		3	0.078	786824.0	7.8
	2	0.079	276483.8	18.6		2	0.078	761336.1	8.2
	1.59	0.079	263840.9	18.9		1.59	0.078	744286.9	8.4
	1	0.079	239252.3	19.7		1	0.078	711332.9	9.2
	0.9	0.079	233825.8	19.9		0.9	0.078	705404.9	9.3
	0.8	0.079	228029.5	20.1		0.8	0.078	697306.0	9.5
	0.7	0.079	221564.0	20.3		0.7	0.078	687763.5	9.6
	0.6	0.079	214176.2	20.6		0.6	0.078	676962.0	9.8
	0.5	0.079	205643.8	20.9		0.5	0.078	663812.4	10.1
	0.4	0.079	195503.6	21.3		0.4	0.078	647768.6	10.4
	0.3	0.080	182822.9	21.8		0.3	0.078	627454.0	10.8
	0.2	0.080	165738.2	22.6		0.2	0.078	598394.1	11.4
	0.1	0.080	139019.7	24.0		0.1	0.078	547607.9	12.6
-12.0	1.59	0.079	406002.8	14.9	-30.0	1.59	0.078	876424.8	6.7
	10	0.078	532127.7	12.2		10	0.077	979852.6	4.9
	9	0.079	524930.4	12.3		9	0.078	973820.1	4.9
	8	0.079	517052.6	12.5		8	0.077	969100.6	5.1
	7	0.078	508279.3	12.6		7	0.077	963159.5	5.1
	6	0.079	497886.1	12.9		6	0.078	955846.3	5.3
	5	0.079	485780.6	13.2		5	0.077	946691.1	5.4
	4	0.079	470149.4	13.5		4	0.077	934690.9	5.7
	3	0.079	450550.7	13.9		3	0.078	919330.0	5.9
	2	0.079	423266.6	14.6		2	0.077	895320.1	6.3
	1.59	0.079	408101.4	14.9		1.59	0.078	882379.7	6.4
	1	0.079	377788.2	15.6		1	0.078	850299.2	7.0
	0.9	0.079	370771.2	15.8		0.9	0.078	845067.1	7.3
	0.8	0.079	363363.1	16.0		0.8	0.078	837504.5	7.4
	0.7	0.079	354974.0	16.2		0.7	0.078	828740.1	7.5
	0.6	0.079	345429.1	16.5		0.6	0.078	818160.1	7.7
	0.5	0.079	334246.6	16.8		0.5	0.078	805493.4	7.9
	0.4	0.079	320880.9	17.1		0.4	0.078	789832.7	8.2
	0.3	0.079	304149.1	17.6		0.3	0.078	769706.2	8.5
	0.2	0.079	281270.8	18.3		0.2	0.078	741476.1	9.1
	0.1	0.079	243966.8	19.5		0.1	0.078	689662.1	10.1

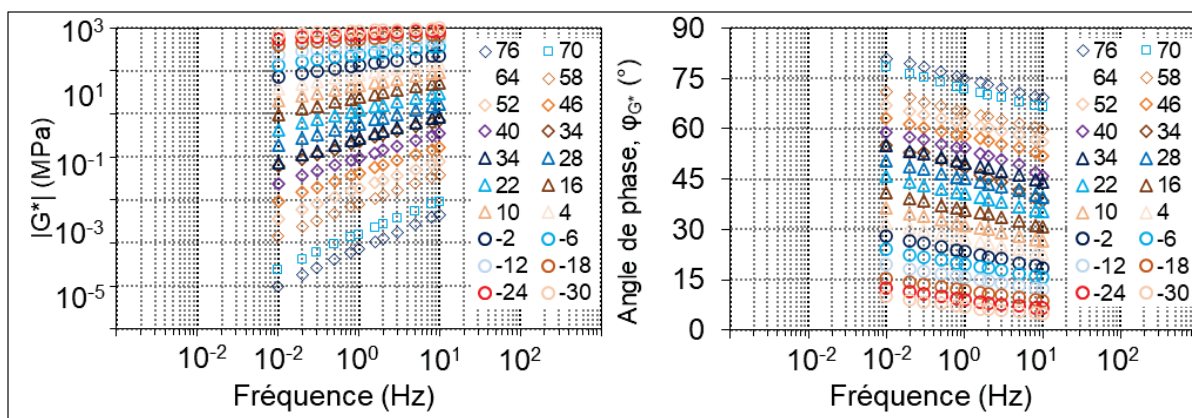


Figure A VII.10 Courbes isothermes RAP-2

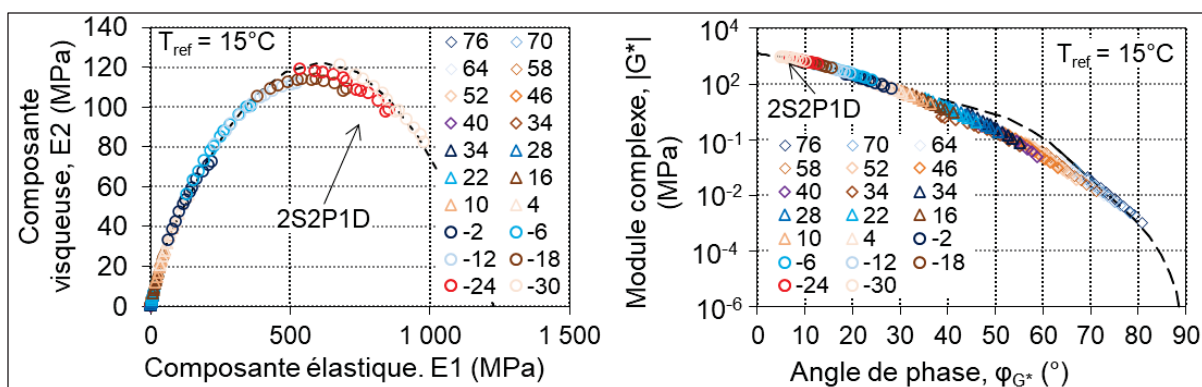


Figure A VII.11 Plans Cole-Cole et black RAP-2

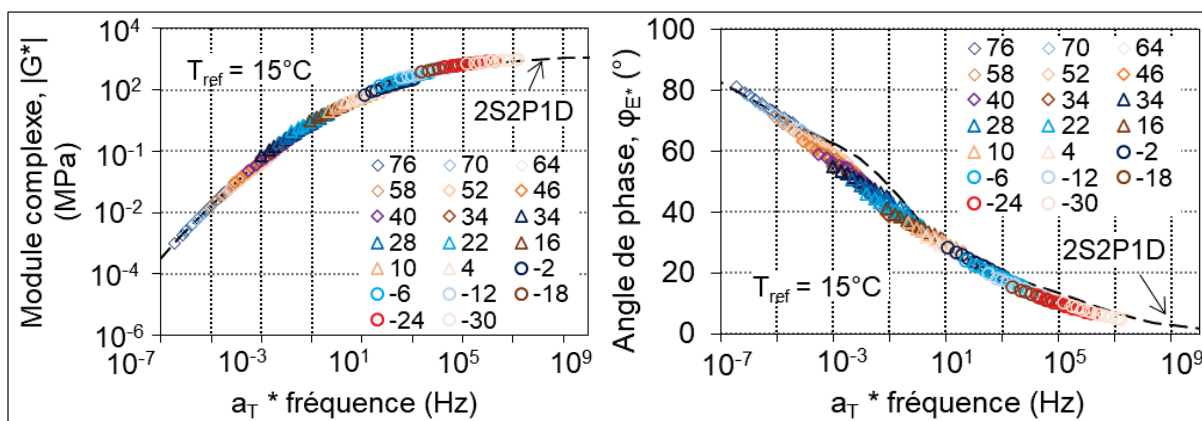


Figure A VII.12 Courbes maîtresses RAP-2

Tableau A VII.24 Paramètres 2S2P1D RAP-2

2S2P1D ($T_{ref} : 15^{\circ}C$)						
G00 (MPa): 0	G0 (MPa): 1228	k: 0.250	h: 0.683	δ : 8.877	β : 230	C1: 26.5 C2: 235
Temperature ($^{\circ}C$)	76.0	70.0	64.0	58.0	52.0	
Tau	8.65E-09	2.22E-08	7.41E-08	2.03E-07	7.66E-07	
Temperature ($^{\circ}C$)	46.0	40.0	34.0	34.0	28.0	
Tau	1.98E-06	7.41E-06	2.47E-05	2.47E-05	1.11E-04	
Temperature ($^{\circ}C$)	22.0	15.0	10.0	4.0	-2.0	
Tau	3.71E-04	2.47E-03	1.11E-02	4.94E-02	2.96E-01	
Temperature ($^{\circ}C$)	-6.0	-12.0	-18.0	-24.0	-30.0	
Tau	1.24E+00	7.91E+00	5.44E+01	4.57E+02	3.71E+03	

Tableau A VII.25 Résultats DSR (diamètre 25 mm) RAP-3

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	1.87	2213.1	62.7	52.0	1.59	1.95	1046.9	64.7	70.0	1.59	2.00	25.1	70.6
	10	0.89	5266.9	63.0		10	1.76	2699.6	64.9		10	2.00	86.0	66.6
	9	1.02	5051.3	63.2		9	1.87	2570.3	65.2		9	2.02	80.3	66.6
	8	1.17	4818.2	63.6		8	1.86	2428.2	65.7		8	2.00	74.3	66.9
	7	1.24	4544.6	64.1		7	1.88	2268.2	66.4		7	2.00	68.0	67.2
	6	1.27	4248.6	64.5		6	1.90	2092.5	66.9		6	2.02	61.4	67.5
	5	1.38	3897.1	65.3		5	1.89	1903.2	67.8		5	2.00	54.4	67.9
	4	1.48	3505.2	65.5		4	1.91	1694.4	68.0		4	2.00	46.8	68.4
	3	1.83	3031.9	65.7		3	1.92	1454.1	68.3		3	2.00	38.6	69.1
	2	1.77	2498.4	65.9		2	1.94	1170.9	68.6		2	2.00	29.3	70.1
	1.59	1.87	2200.5	66.2		1.59	1.95	1028.6	68.9		1.59	2.00	25.1	70.7
	1	1.90	1733.0	66.6		1	1.96	798.9	69.3		1	2.00	18.2	71.9
	0.9	1.91	1642.4	67.1		0.9	1.96	754.9	69.9		0.9	2.00	16.9	72.2
	0.8	1.91	1546.8	67.7		0.8	1.96	707.3	70.6		0.8	2.00	15.6	72.5
	0.7	1.92	1443.4	68.7		0.7	1.96	656.3	71.6		0.7	2.00	14.2	72.9
	0.6	1.92	1328.8	70.4		0.6	1.97	602.5	73.8		0.6	2.00	12.8	73.3
	0.5	1.93	1202.4	66.9		0.5	1.97	544.8	55.6		0.5	2.00	11.2	73.8
40.0	0.4	1.93	1061.3	64.0	58.0	0.4	1.98	482.9	56.0	76.0	0.4	2.00	9.6	74.4
	0.3	1.95	914.3	64.1		0.3	1.98	409.9	56.6		0.3	2.00	7.8	75.2
	0.2	1.95	740.0	64.3		0.2	1.98	324.4	57.6		0.2	2.00	5.8	76.3
	0.1	1.99	505.1	64.4		0.1	1.98	216.8	58.9		0.1	2.00	3.5	78.3
	1.59	1.95	1046.9	64.7		1.59	1.98	484.2	56.4		1.59	2.00	12.9	73.7
	10	1.76	2699.6	64.9		10	1.93	1348.4	51.9		10	2.00	46.1	69.4
	9	1.87	2570.3	65.2		9	1.95	1275.6	52.5		9	2.02	42.9	69.4
	8	1.86	2428.2	65.7		8	1.94	1197.9	52.8		8	2.00	39.6	69.7
	7	1.88	2268.2	66.4		7	1.95	1112.0	53.3		7	2.00	36.2	70.0
	6	1.90	2092.5	66.9		6	1.97	1019.8	53.7		6	2.02	32.5	70.4
	5	1.89	1903.2	67.8		5	1.95	921.9	54.2		5	2.00	28.7	70.8
	4	1.91	1694.4	68.0		4	1.96	812.6	54.8		4	2.00	24.6	71.4
	3	1.92	1454.1	68.3		3	1.97	690.1	55.4		3	2.00	20.1	72.1
	2	1.94	1170.9	68.6		2	1.97	545.1	56.6		2	2.00	15.1	73.2
	1.59	1.95	1028.6	68.9		1.59	1.98	477.6	57.2		1.59	2.00	12.9	73.8
	1	1.96	798.9	69.3		1	1.98	365.1	57.9		1	2.00	9.2	75.0
	0.9	1.96	754.9	69.9		0.9	1.98	344.1	58.1		0.9	2.00	8.6	75.3
46.0	0.8	1.96	707.3	70.6		0.8	1.98	321.7	58.4		0.8	2.00	7.9	75.6
	0.7	1.96	656.3	71.6		0.7	1.99	297.8	58.6		0.7	2.00	7.1	76.0
	0.6	1.97	602.5	73.8		0.6	1.99	271.9	58.9		0.6	2.00	6.4	76.4
	0.5	1.97	544.8	55.6		0.5	1.99	243.9	59.4		0.5	2.00	5.6	76.9
	0.4	1.98	482.9	56.0		0.4	1.99	213.6	59.8		0.4	2.00	4.7	77.5
	0.3	1.98	409.9	56.6		0.3	1.99	180.0	60.5		0.3	2.00	3.8	78.2
	0.2	1.98	324.4	57.6		0.2	1.99	141.1	61.4		0.2	2.00	2.8	79.3
	0.1	1.98	216.8	58.9		0.1	2.03	92.2	63.2		0.1	2.00	1.7	80.9
	1.59	1.98	484.2	56.4	64.0	1.59	2.00	224.0	60.4	82.0	1.59	2.00	6.8	76.5
	10	1.93	1348.4	51.9		10	1.97	664.8	56.2		10	2.00	25.4	71.8
	9	1.95	1275.6	52.5		9	1.99	626.2	56.7		9	2.02	23.6	72.1
	8	1.94	1197.9	52.8		8	1.97	585.1	57.0		8	2.00	21.7	72.4
	7	1.95	1112.0	53.3		7	1.98	541.0	57.3		7	2.00	19.7	72.7
	6	1.97	1019.8	53.7		6	2.00	493.9	57.7		6	2.02	17.7	73.1
	5	1.95	921.9	54.2		5	1.98	443.6	58.1		5	2.00	15.5	73.5
	4	1.96	812.6	54.8		4	1.98	388.4	58.6		4	2.00	13.2	74.1
	3	1.97	690.1	55.4		3	1.99	326.7	59.2		3	2.00	10.8	74.9
	2	1.97	545.1	56.6		2	1.99	256.0	60.3		2	2.00	8.0	76.0
	1.59	1.98	477.6	57.2		1.59	1.99	223.0	60.5		1.59	2.00	6.8	76.6
	1	1.98	365.1	57.9		1	1.99	167.9	61.5		1	2.00	4.8	77.8
	0.9	1.98	344.1	58.1		0.9	2.00	157.6	61.7		0.9	2.00	4.4	78.0
	0.8	1.98	321.7	58.4		0.8	1.99	146.7	62.0		0.8	2.00	4.0	78.3
	0.7	1.99	297.8	58.6		0.7	1.99	135.2	62.2		0.7	2.00	3.7	78.7
	0.6	1.99	271.9	58.9		0.6	2.00	123.0	62.6		0.6	2.00	3.3	79.1
	0.5	1.99	243.9	59.4		0.5	2.00	109.8	63.0		0.5	2.00	2.8	79.5
	0.4	1.99	213.6	59.8		0.4	2.00	95.6	63.5		0.4	2.00	2.4	80.1
	0.3	1.99	180.0	60.5		0.3	2.00	79.8	64.2		0.3	2.00	1.9	80.7
	0.2	1.99	141.1	61.4		0.2	2.00	61.8	65.2		0.2	2.00	1.4	81.8
	0.1	2.03	92.2	63.2		0.1	2.00	39.6	67.1		0.1	2.01	0.8	82.9

Tableau A VII.26 Résultats DSR (diamètre 8 mm) RAP-3

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.15	2695.4	47.0	16.0	1.59	0.15	23625.6	33.7	-2.0	1.59	0.15	128813.3	22.0
	10	0.15	6768.5	43.2		10	0.15	44840.9	30.5		10	0.14	194827.2	19.1
	9	0.15	6437.1	43.6		9	0.15	43315.2	30.5		9	0.15	189946.3	19.2
	8	0.15	6085.8	43.8		8	0.15	41708.0	30.6		8	0.14	185778.7	19.3
	7	0.15	5708.1	44.1		7	0.15	39915.3	30.9		7	0.14	180980.5	19.6
	6	0.15	5297.2	44.4		6	0.15	37904.2	31.2		6	0.15	174932.9	19.8
	5	0.15	4844.6	44.8		5	0.15	35654.3	31.4		5	0.14	168780.5	20.1
	4	0.15	4337.3	45.2		4	0.15	33010.7	31.9		4	0.14	160141.2	20.4
	3	0.15	3754.0	45.8		3	0.15	29844.7	32.5		3	0.15	151121.5	20.8
	2	0.15	3051.4	46.5		2	0.15	25850.7	33.3		2	0.15	136705.9	21.3
	1.59	0.15	2710.7	47.0		1.59	0.15	23753.9	33.6		1.59	0.15	129427.5	21.8
	1	0.15	2124.4	47.8		1	0.15	19977.6	34.5		1	0.15	115514.9	22.6
	0.9	0.15	2010.2	48.0		0.9	0.15	19204.1	34.7		0.9	0.15	112748.8	22.7
	0.8	0.15	1889.3	48.2		0.8	0.15	18371.0	35.0		0.8	0.15	109527.8	22.9
	0.7	0.15	1760.3	48.4		0.7	0.15	17460.5	35.2		0.7	0.15	105944.7	23.1
	0.6	0.15	1621.8	48.7		0.6	0.15	16461.3	35.5		0.6	0.15	101957.8	23.4
	0.5	0.15	1470.8	49.0		0.5	0.15	15338.3	35.9		0.5	0.15	97354.5	23.7
	0.4	0.15	1303.7	49.4		0.4	0.15	14048.9	36.4		0.4	0.15	91863.1	24.0
	0.3	0.15	1114.2	49.9		0.3	0.15	12520.8	36.9		0.3	0.15	85102.0	24.4
	0.2	0.15	890.3	50.5		0.2	0.15	10611.4	37.8		0.2	0.15	76291.9	25.1
	0.1	0.15	589.8	51.7		0.1	0.15	7918.2	39.3		0.1	0.15	62619.4	26.3
28.0	1.59	0.15	5872.2	42.6	10.0	1.59	0.15	43978.5	29.4	-8.0	1.59	0.14	205001.9	18.3
	10	0.15	13409.3	39.0		10	0.15	76754.3	26.4		10	0.14	291003.6	15.6
	9	0.15	12822.3	39.1		9	0.15	74495.7	26.5		9	0.14	285130.3	15.7
	8	0.15	12203.9	39.3		8	0.15	72071.9	26.7		8	0.14	279105.6	16.0
	7	0.15	11521.7	39.6		7	0.15	69419.7	26.9		7	0.14	273231.7	16.1
	6	0.15	10777.5	39.9		6	0.15	66392.0	27.2		6	0.14	266240.7	16.3
	5	0.15	9949.1	40.2		5	0.15	63003.0	27.5		5	0.14	258174.5	16.6
	4	0.15	9011.6	40.7		4	0.15	58884.6	27.8		4	0.14	247902.3	16.9
	3	0.15	7913.6	41.3		3	0.15	53946.4	28.3		3	0.14	234312.9	17.4
	2	0.15	6566.0	42.2		2	0.15	47560.7	29.1		2	0.14	218225.2	17.5
	1.59	0.15	5899.2	42.6		1.59	0.15	44268.7	29.5		1.59	0.14	207175.5	17.9
	1	0.15	4731.9	43.6		1	0.15	38087.2	30.2		1	0.14	187553.0	19.0
	0.9	0.15	4499.8	43.8		0.9	0.15	36725.7	30.4		0.9	0.14	184885.7	19.0
	0.8	0.15	4252.2	44.0		0.8	0.15	35332.1	30.6		0.8	0.14	180259.1	19.2
	0.7	0.15	3986.6	44.3		0.7	0.15	33805.4	30.9		0.7	0.14	175165.1	19.4
	0.6	0.15	3697.2	44.6		0.6	0.15	32108.1	31.2		0.6	0.14	169106.9	19.6
	0.5	0.15	3380.9	44.9		0.5	0.15	30182.8	31.5		0.5	0.14	162384.9	19.9
	0.4	0.15	3026.3	45.4		0.4	0.15	27953.9	31.9		0.4	0.15	154369.7	20.4
	0.3	0.15	2619.2	45.9		0.3	0.15	25262.6	32.5		0.3	0.15	144599.3	21.0
	0.2	0.15	2129.3	46.7		0.2	0.15	21853.6	33.3		0.2	0.15	131778.8	21.7
	0.1	0.15	1480.8	48.0		0.1	0.15	16906.3	34.8		0.1	0.15	111705.2	23.1
22.0	1.59	0.15	12019.6	38.1	4.0	1.59	0.15	76971.0	25.5					
	10	0.15	24958.7	34.3		10	0.15	124742.8	22.6					
	9	0.15	24009.1	34.7		9	0.15	121718.0	22.7					
	8	0.15	22981.0	35.0		8	0.15	118142.6	22.9					
	7	0.15	21851.7	35.2		7	0.15	114342.3	23.2					
	6	0.15	20601.0	35.5		6	0.15	110160.1	23.4					
	5	0.15	19195.7	35.9		5	0.15	105076.3	23.7					
	4	0.15	17586.6	36.3		4	0.15	99367.5	24.0					
	3	0.15	15675.5	36.8		3	0.15	92122.4	24.4					
	2	0.15	13279.8	37.6		2	0.15	82864.6	25.1					
	1.59	0.15	12074.9	38.1		1.59	0.15	77502.8	25.4					
	1	0.15	9921.8	39.1		1	0.15	68063.3	26.4					
	0.9	0.15	9486.8	39.3		0.9	0.15	65960.7	26.4					
	0.8	0.15	9019.2	39.5		0.8	0.15	63756.5	26.6					
	0.7	0.15	8512.8	39.8		0.7	0.15	61300.1	26.8					
	0.6	0.15	7959.3	40.1		0.6	0.15	58573.4	27.1					
	0.5	0.15	7345.1	40.5		0.5	0.15	55488.5	27.4					
	0.4	0.15	6649.8	40.9		0.4	0.15	51958.1	27.8					
	0.3	0.15	5839.1	41.5		0.3	0.15	47634.7	28.3					
	0.2	0.15	4843.3	42.4		0.2	0.15	41973.1	29.1					
	0.1	0.15	3482.8	43.9		0.1	0.15	33530.8	30.4					

Tableau A VII.27 Résultats DSR (diamètre 4 mm) RAP-3

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
0.0	1.59	0.100	117506.8	23.5	-18.0	1.59	0.099	469430.7	11.3
	10	0.099	185776.7	20.1		10	0.098	596224.3	8.9
	9	0.100	181606.9	20.2		9	0.099	589717.0	8.9
	8	0.099	176826.0	20.4		8	0.098	582198.6	9.0
	7	0.100	171513.3	20.7		7	0.099	573347.7	9.3
	6	0.100	165489.0	20.9		6	0.099	562627.5	9.5
	5	0.099	158488.5	21.2		5	0.098	550460.9	9.7
	4	0.099	150146.9	21.7		4	0.098	535087.3	10.0
	3	0.100	139824.4	22.2		3	0.098	514884.6	10.4
	2	0.100	126003.4	23.0		2	0.098	487191.0	10.9
	1.59	0.100	118774.2	23.4		1.59	0.099	471447.7	11.2
	1	0.100	104915.7	24.3		1	0.098	440324.2	11.9
	0.9	0.100	102028.7	24.5		0.9	0.099	433283.4	12.1
	0.8	0.100	98866.9	24.7		0.8	0.098	425672.8	12.2
	0.7	0.100	95365.2	25.0		0.7	0.099	417013.7	12.4
	0.6	0.100	91429.3	25.3		0.6	0.099	407161.1	12.7
	0.5	0.100	86913.9	25.7		0.5	0.099	395682.8	13.0
	0.4	0.100	81611.5	26.2		0.4	0.099	381887.0	13.3
	0.3	0.100	75130.6	26.8		0.3	0.099	364272.1	13.7
	0.2	0.100	66617.5	27.7		0.2	0.099	340040.7	14.4
	0.1	0.100	53675.0	29.3		0.1	0.099	300327.2	15.5
-6.0	1.59	0.099	200361.3	18.9	-24.0	1.59	0.098	610548.7	8.7
	10	0.099	292413.7	15.7		10	0.097	737870.4	6.6
	9	0.100	286938.1	16.0		9	0.098	732066.2	6.6
	8	0.099	280763.0	16.2		8	0.097	725555.7	6.7
	7	0.099	273706.7	16.4		7	0.098	717217.9	6.9
	6	0.100	265587.3	16.7		6	0.098	706740.8	7.1
	5	0.099	256160.2	17.0		5	0.098	695150.8	7.2
	4	0.099	244771.2	17.3		4	0.098	680282.6	7.5
	3	0.099	230641.0	17.8		3	0.098	659336.5	7.8
	2	0.099	211424.7	18.6		2	0.098	631897.0	8.2
	1.59	0.099	201197.4	18.9		1.59	0.098	614799.4	8.4
	1	0.099	181205.9	19.7		1	0.098	581651.0	9.2
	0.9	0.099	176915.3	19.9		0.9	0.098	574814.6	9.3
	0.8	0.099	172250.6	20.1		0.8	0.098	566772.9	9.5
	0.7	0.100	167027.0	20.3		0.7	0.098	557636.1	9.6
	0.6	0.100	161130.2	20.6		0.6	0.098	547061.2	9.8
	0.5	0.100	154346.7	20.9		0.5	0.098	534472.5	10.1
	0.4	0.099	146367.0	21.3		0.4	0.098	519309.4	10.4
	0.3	0.100	136467.6	21.8		0.3	0.098	500003.1	10.8
	0.2	0.100	123249.2	22.6		0.2	0.098	472579.3	11.4
	0.1	0.100	102612.7	24.0		0.1	0.098	425756.1	12.6
-12.0	1.59	0.099	316370.9	14.9	-30.0	1.59	0.098	749472.6	6.7
	10	0.098	429986.1	12.2		10	0.097	869506.7	4.9
	9	0.099	423524.2	12.3		9	0.098	864384.1	4.9
	8	0.099	416336.9	12.5		8	0.097	858851.7	5.1
	7	0.099	407894.5	12.6		7	0.097	851155.8	5.1
	6	0.100	398154.8	12.9		6	0.098	841278.0	5.3
	5	0.099	386816.8	13.2		5	0.097	830504.4	5.4
	4	0.099	372880.1	13.5		4	0.097	816306.7	5.7
	3	0.099	355175.4	13.9		3	0.097	796570.1	5.9
	2	0.099	330701.8	14.6		2	0.097	771073.1	6.3
	1.59	0.099	317431.7	14.9		1.59	0.098	753701.3	6.4
	1	0.099	291336.6	15.6		1	0.098	719794.8	7.0
	0.9	0.099	285428.8	15.8		0.9	0.098	713809.9	7.3
	0.8	0.099	279091.6	16.0		0.8	0.098	705522.2	7.4
	0.7	0.099	272072.5	16.2		0.7	0.098	696034.0	7.5
	0.6	0.099	264086.1	16.5		0.6	0.098	685140.2	7.7
	0.5	0.099	254901.0	16.8		0.5	0.098	672131.9	7.9
	0.4	0.099	243716.6	17.1		0.4	0.098	656061.5	8.2
	0.3	0.099	229952.1	17.6		0.3	0.098	635625.2	8.5
	0.2	0.099	211453.1	18.3		0.2	0.098	606711.6	9.1
	0.1	0.099	181612.4	19.5		0.1	0.098	556470.1	10.1

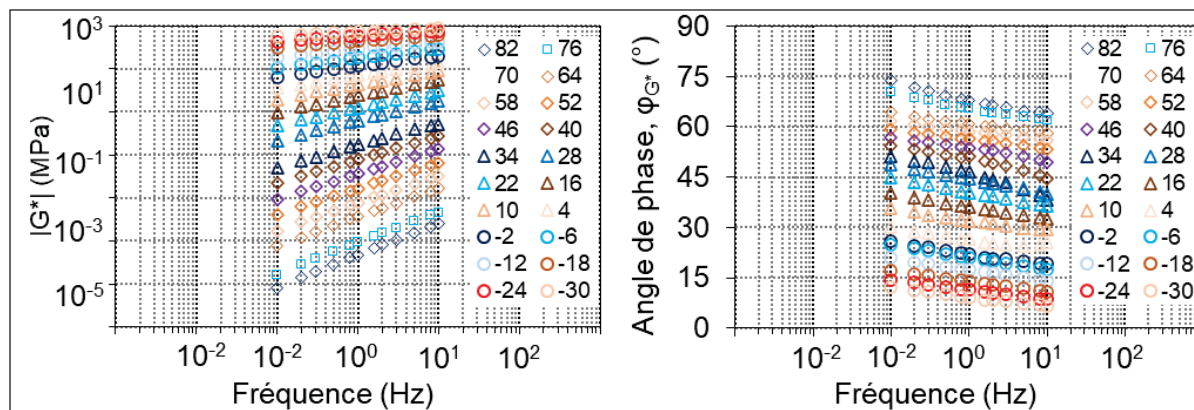


Figure A VII.13 Courbes isothermes RAP-3

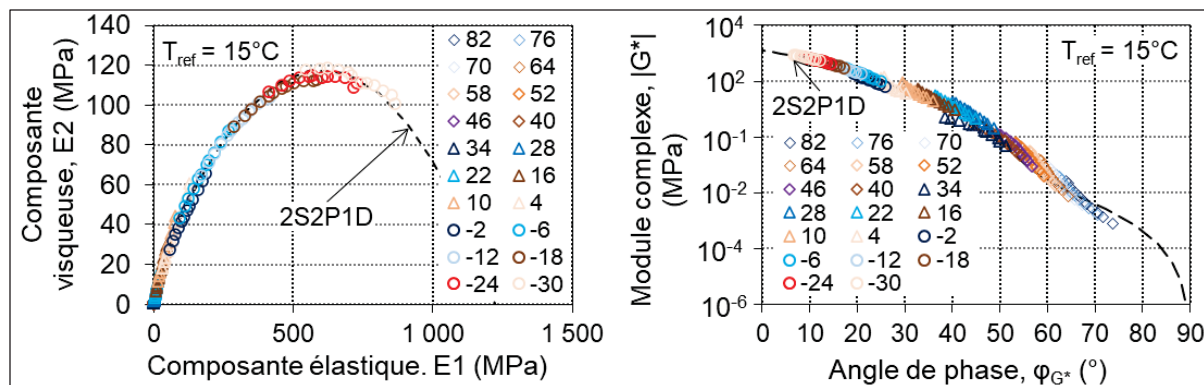


Figure A VII.14 Plans Cole-Cole et black RAP-3

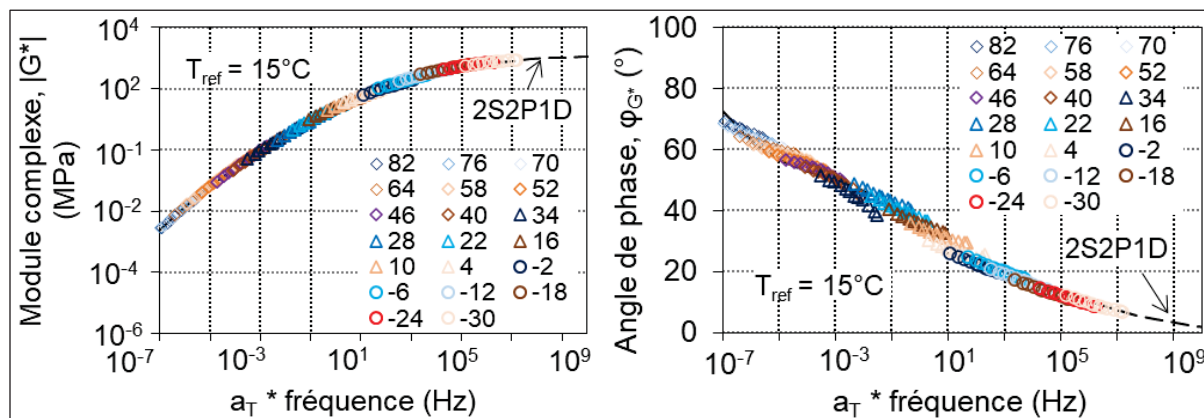


Figure A VII.15 Courbes maîtresses RAP-3

Tableau A VII.28 Paramètres 2S2P1D RAP-3

2S2P1D ($T_{ref} : 15^{\circ}C$)						
G00 (MPa): 0	G0 (MPa): 1225	k: 0.240	h: 0.852	δ : 7.300	β : 6489	C1: 46.4 C2: 383
Temperature ($^{\circ}C$)	82.0	76.0	70.0	64.0	58.0	
Tau	2.26E-10	4.96E-10	1.35E-09	3.61E-09	1.08E-08	
Temperature ($^{\circ}C$)	52.0	46.0	40.0	34.0	28.0	
Tau	4.06E-08	1.62E-07	7.22E-07	2.71E-06	4.06E-05	
Temperature ($^{\circ}C$)	22.0	15.0	10.0	4.0	-2.0	
Tau	1.62E-04	9.02E-04	4.06E-03	1.80E-02	1.08E-01	
Temperature ($^{\circ}C$)	-6.0	-12.0	-18.0	-24.0	-30.0	
Tau	4.51E-01	2.89E+00	1.99E+01	1.67E+02	1.35E+03	

Tableau A VII.29 Résultats DSR (diamètre 25 mm) RAP-4

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.43	5042.6	41.1	52.0	1.59	0.47	2409.8	48.3	70.0	1.59	0.50	42.2	69.3
	10	0.35	10872.4	32.0		10	0.41	5981.4	40.2		10	0.50	163.6	65.2
	9	0.36	10401.9	32.1		9	0.42	5735.1	40.5		9	0.50	151.9	65.2
	8	0.36	9984.2	32.5		8	0.42	5449.5	41.2		8	0.50	139.6	65.5
	7	0.37	9459.1	33.3		7	0.43	5075.1	41.9		7	0.50	126.9	65.7
	6	0.38	8942.7	34.5		6	0.44	4779.8	42.8		6	0.50	113.5	66.1
	5	0.38	8398.2	35.5		5	0.44	4373.8	43.6		5	0.50	99.4	66.4
	4	0.39	7670.1	36.7		4	0.44	3920.4	44.7		4	0.50	84.4	67.0
	3	0.40	6875.4	38.5		3	0.45	3395.3	45.7		3	0.50	68.2	67.7
	2	0.42	5839.8	39.9		2	0.46	2722.7	47.3		2	0.50	50.2	68.7
	1.59	0.43	5007.2	40.2		1.59	0.47	2419.0	48.5		1.59	0.50	42.2	69.3
	1	0.44	4037.0	43.1		1	0.47	1874.3	50.4		1	0.50	29.5	70.5
	0.9	0.44	3880.8	43.8		0.9	0.48	1759.6	50.5		0.9	0.50	27.1	70.8
	0.8	0.45	3671.1	44.3		0.8	0.48	1652.5	51.1		0.8	0.50	24.7	71.1
	0.7	0.45	3429.9	44.7		0.7	0.48	1533.6	51.6		0.7	0.50	22.3	71.5
	0.6	0.45	3175.3	45.5		0.6	0.48	1404.8	52.1		0.6	0.50	19.7	71.9
	0.5	0.46	2891.8	46.4		0.5	0.48	1261.0	52.5		0.5	0.50	17.0	72.4
	0.4	0.46	2572.8	47.5		0.4	0.49	1095.7	52.8		0.4	0.50	14.2	73.1
40.0	0.3	0.47	2205.8	49.3	58.0	0.3	0.49	921.5	53.7	76.0	0.3	0.50	11.3	73.9
	0.2	0.48	1768.9	51.1		0.2	0.49	737.0	55.5		0.2	0.50	8.1	75.1
	0.1	0.48	1194.2	52.4		0.1	0.49	473.3	56.9		0.1	0.55	4.5	77.5
	1.59	0.47	2409.8	48.3		1.59	0.49	1087.8	54.0		1.59	0.50	19.6	72.5
	10	0.41	5981.4	40.2		10	0.46	3055.8	47.6		10	0.50	81.3	67.8
	9	0.42	5735.1	40.5		9	0.46	2922.5	48.1		9	0.50	75.2	68.2
	8	0.42	5449.5	41.2		8	0.46	2734.5	48.4		8	0.50	68.9	68.4
	7	0.43	5075.1	41.9		7	0.47	2546.4	49.1		7	0.50	62.3	68.7
	6	0.44	4779.8	42.8		6	0.47	2340.0	49.7		6	0.50	55.4	69.1
	5	0.44	4373.8	43.6		5	0.47	2120.2	50.4		5	0.50	48.2	69.6
	4	0.44	3920.4	44.7		4	0.48	1863.8	51.2		4	0.50	40.6	70.1
	3	0.45	3395.3	45.7		3	0.48	1585.0	52.1		3	0.50	32.5	70.8
	2	0.46	2722.7	47.3		2	0.48	1250.7	53.4		2	0.50	23.6	71.9
	1.59	0.47	2419.0	48.5		1.59	0.49	1085.7	54.1		1.59	0.50	19.6	72.5
	1	0.47	1874.3	50.4		1	0.49	818.4	55.7		1	0.50	13.5	73.8
	0.9	0.48	1759.6	50.5		0.9	0.49	769.4	55.8		0.9	0.50	12.4	74.1
	0.8	0.48	1652.5	51.1		0.8	0.49	715.4	56.0		0.8	0.50	11.2	74.4
	0.7	0.48	1533.6	51.6		0.7	0.49	658.3	56.3		0.7	0.50	10.1	74.8
46.0	0.6	0.48	1404.8	52.1	64.0	0.6	0.49	598.1	56.6	82.0	0.6	0.50	8.8	75.2
	0.5	0.48	1261.0	52.5		0.5	0.49	534.4	57.3		0.5	0.50	7.6	75.7
	0.4	0.49	1095.7	52.8		0.4	0.50	466.5	58.1		0.4	0.50	6.2	76.8
	0.3	0.49	921.5	53.7		0.3	0.49	387.1	58.6		0.3	0.50	4.9	77.5
	0.2	0.49	737.0	55.5		0.2	0.50	297.3	59.6		0.2	0.45	3.5	78.0
	0.1	0.49	473.3	56.9		0.1	0.49	187.9	61.4		0.1	0.53	1.9	80.2
	1.59	0.49	1087.8	54.0		1.59	0.49	479.4	58.3		1.59	0.49	9.4	75.6
	10	0.46	3055.8	47.6		10	0.48	1488.4	53.5		10	0.45	41.1	70.7
	9	0.46	2922.5	48.1		9	0.49	1399.5	53.8		9	0.50	37.9	71.0
	8	0.46	2734.5	48.4		8	0.48	1308.0	54.2		8	0.50	34.6	71.2
	7	0.47	2546.4	49.1		7	0.49	1207.5	54.7		7	0.50	31.1	71.6
	6	0.47	2340.0	49.7		6	0.49	1100.0	55.1		6	0.50	27.6	72.0
	5	0.47	2120.2	50.4		5	0.49	984.8	55.6		5	0.50	23.8	72.5
	4	0.48	1863.8	51.2		4	0.49	859.3	56.3		4	0.50	19.9	73.0
	3	0.48	1585.0	52.1		3	0.49	716.3	57.0		3	0.50	15.8	73.8
	2	0.48	1250.7	53.4		2	0.49	557.0	58.4		2	0.50	11.3	74.9
	1.59	0.49	1085.7	54.1		1.59	0.50	480.2	58.7		1.59	0.50	9.3	75.5
	1	0.49	818.4	55.7		1	0.50	355.2	59.7		1	0.52	6.4	76.6
	0.9	0.49	769.4	55.8		0.9	0.50	331.5	60.0		0.9	0.50	5.8	77.3
	0.8	0.49	715.4	56.0		0.8	0.50	306.8	60.2		0.8	0.50	5.2	77.4
	0.7	0.49	658.3	56.3		0.7	0.50	280.7	60.6		0.7	0.50	4.7	77.8
	0.6	0.49	598.1	56.6		0.6	0.50	253.2	61.0		0.6	0.50	4.1	78.2
	0.5	0.49	534.4	57.3		0.5	0.50	224.1	61.4		0.5	0.50	3.5	78.6
	0.4	0.50	466.5	58.1		0.4	0.50	192.8	61.9		0.4	0.49	2.9	79.2
	0.3	0.49	387.1	58.6		0.3	0.50	158.4	62.6		0.3	0.49	2.2	79.9
	0.2	0.50	297.3	59.6		0.2	0.50	119.5	63.6		0.2	0.49	1.5	81.2
	0.1	0.49	187.9	61.4		0.1	0.52	73.4	65.6		0.1	0.45	0.8	82.4

Tableau A VII.30 Résultats DSR (diamètre 8 mm) RAP-4

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.50	6547.3	46.1	16.0	1.59	0.50	52457.9	29.9	-2.0	1.59	0.48	233938.6	17.4
	10	0.50	15651.6	41.0		10	0.49	91431.9	25.9		10	0.39	325202.1	14.2
	9	0.50	14923.2	41.3		9	0.50	88998.9	26.2		9	0.47	321341.9	14.3
	8	0.50	14169.9	41.7		8	0.49	86238.5	26.4		8	0.47	316591.0	14.6
	7	0.50	13346.4	42.0		7	0.49	83083.2	26.8		7	0.47	310558.9	14.8
	6	0.50	12445.8	42.5		6	0.50	79472.6	27.1		6	0.47	303611.7	15.1
	5	0.50	11446.7	43.0		5	0.49	75397.1	27.5		5	0.47	294519.0	15.4
	4	0.50	10316.5	43.6		4	0.49	70484.3	28.0		4	0.47	283456.5	15.7
	3	0.50	8998.0	44.4		3	0.49	64532.5	28.6		3	0.47	270306.2	16.2
	2	0.50	7380.3	45.5		2	0.49	56725.3	29.6		2	0.39	251101.1	16.7
	1.59	0.50	6586.7	46.1		1.59	0.50	52768.2	30.2		1.59	0.48	237919.7	17.2
	1	0.50	5200.1	47.4		1	0.50	45301.0	31.1		1	0.48	217536.9	18.1
	0.9	0.50	4929.1	47.6		0.9	0.50	43621.8	31.3		0.9	0.48	213490.4	18.2
	0.8	0.50	4640.5	47.9		0.8	0.50	41932.8	31.6		0.8	0.48	208381.7	18.3
	0.7	0.50	4330.4	48.3		0.7	0.50	40074.2	31.9		0.7	0.48	202544.5	18.6
	0.6	0.50	3995.1	48.7		0.6	0.50	38005.0	32.3		0.6	0.48	195900.3	18.9
	0.5	0.50	3627.7	49.2		0.5	0.50	35649.0	32.8		0.5	0.48	188197.2	19.3
28.0	0.4	0.50	3217.9	49.8	10.0	0.4	0.50	32922.3	33.3	-8.0	0.4	0.48	179042.8	19.8
	0.3	0.50	2750.4	50.5		0.3	0.50	29657.7	34.0		0.3	0.48	167749.7	20.4
	0.2	0.50	2195.5	51.6		0.2	0.50	25494.8	35.1		0.2	0.48	152564.5	21.2
	0.1	0.50	1473.5	53.4		0.1	0.50	19470.4	37.0		0.1	0.49	128970.8	22.7
	1.59	0.50	14073.5	40.5		1.59	0.49	92291.2	25.3		1.59	0.35	334084.1	14.3
	10	0.50	29901.9	35.7		10	0.48	147640.1	21.8		10	0.29	437558.7	10.8
	9	0.50	28731.1	36.0		9	0.49	144729.9	21.9		9	0.38	432926.1	11.1
	8	0.50	27470.6	36.3		8	0.49	141197.6	22.1		8	0.39	429605.6	11.2
	7	0.50	26076.0	36.6		7	0.49	136922.8	22.4		7	0.39	423948.2	11.5
	6	0.50	24537.3	37.0		6	0.49	131893.3	22.7		6	0.37	415966.5	11.7
	5	0.50	22820.2	37.5		5	0.49	126165.5	23.1		5	0.41	406505.2	12.0
	4	0.50	20839.3	38.1		4	0.49	119264.9	23.5		4	0.39	395180.0	12.3
	3	0.50	18503.8	38.9		3	0.49	110598.9	24.0		3	0.42	379246.1	12.8
	2	0.50	15566.7	39.9		2	0.49	99571.9	24.6		2	0.29	358778.5	13.4
	1.59	0.50	14096.7	40.5		1.59	0.49	93068.0	25.2		1.59	0.37	345289.6	13.7
	1	0.50	11461.5	41.8		1	0.49	81769.8	26.4		1	0.44	319795.0	14.3
	0.9	0.50	10931.9	42.1		0.9	0.49	79287.2	26.5		0.9	0.47	315738.5	14.7
22.0	0.8	0.50	10363.4	42.4	4.0	0.8	0.49	76595.5	26.8		0.8	0.41	310763.0	14.8
	0.7	0.50	9748.7	42.8		0.7	0.49	73591.5	27.1		0.7	0.45	303465.5	15.0
	0.6	0.50	9077.2	43.2		0.6	0.49	70272.2	27.4		0.6	0.46	296499.3	15.1
	0.5	0.50	8332.4	43.7		0.5	0.49	66508.1	27.9		0.5	0.47	287124.3	15.4
	0.4	0.50	7492.8	44.3		0.4	0.49	62179.2	28.3		0.4	0.47	274955.9	15.7
	0.3	0.50	6516.9	45.1		0.3	0.49	56906.3	28.9		0.3	0.47	259631.6	16.2
	0.2	0.50	5328.2	46.2		0.2	0.50	49934.3	29.9		0.2	0.48	237883.3	17.2
	0.1	0.50	3727.5	48.2		0.1	0.50	39598.9	31.7		0.1	0.48	204898.8	18.1
	1.59	0.50	27977.6	35.1		1.59	0.48	151574.4	21.1					
	10	0.49	53602.7	30.8		10	0.48	225103.1	17.8					
	9	0.50	51846.4	30.9		9	0.48	221766.5	17.9					
	8	0.50	49908.4	31.2		8	0.48	217477.2	18.1					
	7	0.50	47741.1	31.5		7	0.48	212158.4	18.4					
	6	0.50	45304.4	31.9		6	0.48	205794.3	18.7					
	5	0.50	42569.4	32.4		5	0.48	198388.6	19.1					
	4	0.50	39351.6	32.9		4	0.48	189296.4	19.4					
	3	0.50	35489.5	33.6		3	0.48	177816.5	20.0					
	2	0.50	30571.9	34.8		2	0.48	163021.5	20.2					
	1.59	0.50	28087.6	35.2		1.59	0.48	153317.2	20.8					
	1	0.50	23475.3	36.3		1	0.49	137268.6	22.0					
	0.9	0.50	22521.5	36.6		0.9	0.49	134517.9	22.2					
	0.8	0.50	21505.3	36.9		0.8	0.49	130583.5	22.4					
	0.7	0.50	20399.8	37.2		0.7	0.49	126249.5	22.7					
	0.6	0.50	19176.8	37.6		0.6	0.49	121309.4	23.0					
	0.5	0.50	17810.2	38.1		0.5	0.49	115676.0	23.5					
	0.4	0.50	16242.3	38.7		0.4	0.49	109079.1	24.0					
	0.3	0.50	14388.2	39.5		0.3	0.49	101045.6	24.7					
	0.2	0.50	12071.7	40.6		0.2	0.49	90369.4	25.3					
	0.1	0.50	8825.8	42.6		0.1	0.49	74083.3	26.9					

Tableau A VII.31 Résultats DSR (diamètre 4 mm) RAP-4

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
-2.0	1.59	0.010	332113.3	16.9	-20.0	1.59	0.010	865905.2	7.8
	10	0.010	454000.2	14.0		10	0.010	980854.8	4.8
	9	0.010	448091.0	14.0		9	0.010	972849.4	4.8
	8	0.010	441342.9	14.2		8	0.010	966670.0	4.8
	7	0.010	433532.5	14.4		7	0.010	961088.9	5.0
	6	0.010	424016.3	14.6		6	0.010	954098.7	5.1
	5	0.010	412773.1	14.9		5	0.010	944985.4	5.3
	4	0.010	398901.9	15.3		4	0.010	934464.7	5.5
	3	0.010	380549.5	15.7		3	0.010	921355.2	5.8
	2	0.010	354869.8	16.5		2	0.010	895998.0	6.0
	1.59	0.010	341142.0	17.0		1.59	0.010	880807.8	6.4
	1	0.010	313619.6	17.6		1	0.010	853892.4	7.0
	0.9	0.010	308351.3	17.8		0.9	0.010	848803.0	7.0
	0.8	0.010	302224.5	18.0		0.8	0.010	842346.8	7.1
	0.7	0.010	295270.6	18.2		0.7	0.010	834574.5	7.8
	0.6	0.010	287377.1	18.5		0.6	0.010	825799.4	7.5
	0.5	0.010	277584.3	18.8		0.5	0.010	815019.8	7.7
	0.4	0.010	265938.1	19.2		0.4	0.010	801162.3	7.9
	0.3	0.010	251301.1	19.7		0.3	0.010	782599.2	8.2
	0.2	0.010	230813.9	20.4		0.2	0.010	756383.3	8.7
	0.1	0.010	197939.9	22.1		0.1	0.010	704895.0	9.5
-8.0	1.59	0.010	515527.0	12.7	-26.0	1.59	0.010	1003509.0	4.8
	10	0.010	646743.6	9.9		10	0.010	1090781.3	3.4
	9	0.010	638109.1	10.0		9	0.010	1083149.1	3.4
	8	0.010	631272.3	10.1		8	0.009	1079820.9	3.5
	7	0.010	622267.2	10.4		7	0.010	1073388.0	3.6
	6	0.010	611829.3	10.6		6	0.010	1067448.7	3.7
	5	0.010	599529.1	10.9		5	0.010	1060155.9	3.8
	4	0.010	584256.0	11.2		4	0.010	1051503.0	4.0
	3	0.010	563650.3	11.6		3	0.010	1042461.0	4.2
	2	0.010	535105.6	12.2		2	0.010	1023037.1	4.2
	1.59	0.010	519042.3	12.6		1.59	0.010	1006840.8	4.5
	1	0.010	486043.9	13.3		1	0.010	984171.9	5.2
	0.9	0.010	478841.0	13.5		0.9	0.010	980893.4	5.1
	0.8	0.010	470939.9	13.7		0.8	0.010	975101.0	5.2
	0.7	0.010	462040.8	13.9		0.7	0.010	968422.8	5.4
	0.6	0.010	451429.9	14.2		0.6	0.010	960404.8	5.6
	0.5	0.010	439101.5	14.5		0.5	0.010	950872.9	5.7
	0.4	0.010	424257.9	14.8		0.4	0.010	939177.9	5.9
	0.3	0.010	404996.1	15.3		0.3	0.010	923175.2	6.3
	0.2	0.010	378355.2	16.1		0.2	0.010	899506.8	6.6
	0.1	0.010	334754.5	17.3		0.1	0.010	855449.5	7.4
-14.0	1.59	0.010	707027.3	8.9	-32.0	1.59	0.010	1101742.1	3.9
	10	0.010	830190.9	6.8		10	0.010	1175908.6	2.5
	9	0.010	820491.4	7.0		9	0.010	1171623.4	2.4
	8	0.010	813990.4	7.1		8	0.010	1166584.3	2.6
	7	0.010	806666.3	7.2		7	0.010	1162446.4	2.6
	6	0.010	797330.8	7.4		6	0.010	1158665.6	2.7
	5	0.010	786003.9	7.6		5	0.010	1152495.5	2.8
	4	0.010	772512.2	7.9		4	0.010	1146690.1	2.9
	3	0.010	755648.2	8.2		3	0.010	1139667.4	3.0
	2	0.010	726673.4	8.6		2	0.010	1125379.5	3.0
	1.59	0.010	708442.3	8.9		1.59	0.010	1110963.3	3.2
	1	0.010	677621.8	9.7		1	0.010	1091805.0	3.8
	0.9	0.010	671013.4	9.8		0.9	0.010	1090417.3	3.7
	0.8	0.010	663191.3	10.0		0.8	0.010	1085153.2	3.8
	0.7	0.010	654093.0	10.2		0.7	0.010	1079763.4	3.9
	0.6	0.010	643381.0	10.5		0.6	0.010	1073313.5	4.0
	0.5	0.010	630789.1	10.7		0.5	0.010	1064797.3	4.2
	0.4	0.010	615035.8	10.9		0.4	0.010	1054731.0	4.3
	0.3	0.010	594901.5	11.3		0.3	0.010	1041760.4	4.6
	0.2	0.010	565573.5	11.9		0.2	0.010	1021814.1	5.0
	0.1	0.010	515325.4	12.9		0.1	0.010	980220.4	5.5

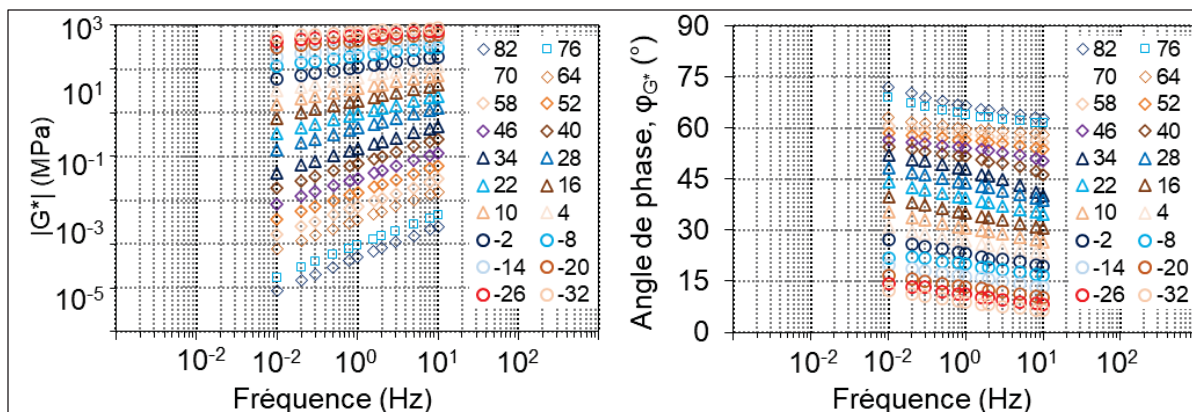


Figure A VII.16 Courbes isothermes RAP-4

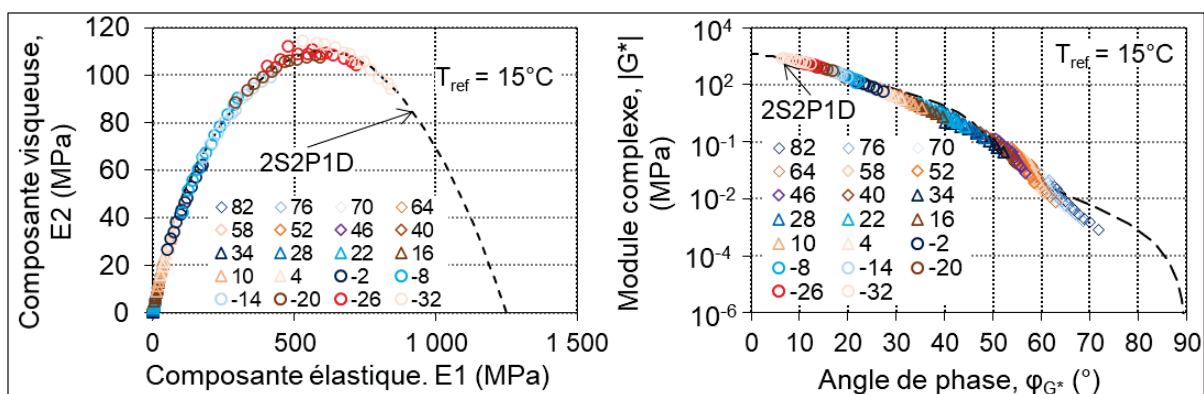


Figure A VII.17 Plans Cole-Cole et black RAP-4

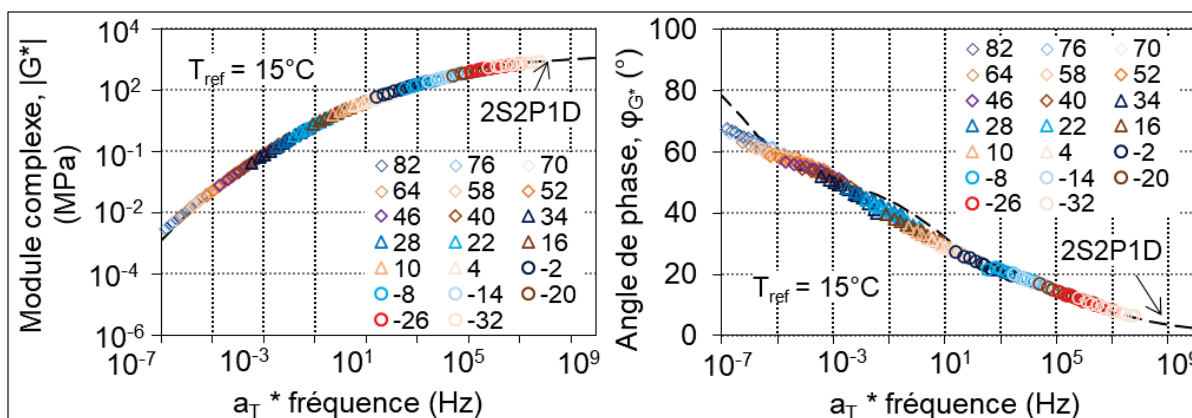


Figure A VII.18 Courbes maîtresses RAP-4

Tableau A VII.32 Paramètres 2S2P1D RAP-4

2S2P1D ($T_{ref} : 15^{\circ}C$)						
G00 (MPa): 0	G0 (MPa): 1250	k: 0.218	h: 0.560	δ : 5.095	β : 8921	C1: 29.8 C2: 228
Temperature ($^{\circ}C$)	82.0	76.0	70.0	64.0	58.0	
Tau	7.50E-11	1.83E-10	4.75E-10	1.35E-09	4.05E-09	
Temperature ($^{\circ}C$)	52.0	46.0	40.0	34.0	28.0	
Tau	1.43E-08	5.05E-08	2.00E-07	8.75E-07	7.50E-06	
Temperature ($^{\circ}C$)	22.0	15.0	10.0	4.0	-2.0	
Tau	3.75E-05	2.50E-04	1.25E-03	8.75E-03	6.25E-02	
Temperature ($^{\circ}C$)	-8.0	-14.0	-20.0	-26.0	-32.0	
Tau	8.13E-01	7.00E+00	6.25E+01	3.00E+02	1.50E+03	

Tableau A VII.33 Résultats DSR (diamètre 25 mm) RAP-5

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.47	2529.0	46.0	52.0	1.59	0.48	1194.6	51.8	70.0	1.59	0.50	18.3	73.1
	10	0.41	6066.8	38.3		10	0.45	3181.3	45.4		10	0.50	75.8	68.6
	9	0.42	5845.2	38.6		9	0.46	3049.2	45.8		9	0.50	70.0	68.6
	8	0.42	5582.7	39.5		8	0.46	2872.9	46.3		8	0.50	64.1	68.9
	7	0.43	5179.4	39.9		7	0.46	2671.8	46.8		7	0.50	57.9	69.2
	6	0.43	4866.2	40.7		6	0.47	2466.5	47.4		6	0.50	51.5	69.6
	5	0.43	4575.6	41.6		5	0.47	2243.0	48.1		5	0.50	44.8	70.1
	4	0.44	4057.8	42.5		4	0.47	1989.2	48.9		4	0.50	37.7	70.6
	3	0.45	3585.7	43.8		3	0.48	1708.0	49.8		3	0.50	30.1	71.4
	2	0.46	2914.0	44.4		2	0.48	1360.9	51.0		2	0.50	21.8	72.5
	1.59	0.46	2566.0	45.9		1.59	0.49	1189.0	51.8		1.59	0.50	18.2	73.1
	1	0.47	2014.0	47.9		1	0.49	907.7	53.4		1	0.50	12.5	74.4
	0.9	0.47	1906.8	48.2		0.9	0.49	858.1	53.8		0.9	0.50	11.5	74.7
	0.8	0.48	1782.1	48.6		0.8	0.49	800.7	54.1		0.8	0.50	10.4	75.0
	0.7	0.48	1664.7	49.1		0.7	0.49	739.8	54.5		0.7	0.50	9.3	75.4
	0.6	0.48	1530.8	49.8		0.6	0.49	675.1	54.8		0.6	0.50	8.2	75.8
	0.5	0.48	1385.2	50.7		0.5	0.49	605.1	55.0		0.5	0.50	7.1	76.3
40.0	0.4	0.48	1224.3	51.8	58.0	0.4	0.49	529.1	55.8	76.0	0.4	0.50	5.8	77.0
	0.3	0.49	1039.6	51.8		0.3	0.49	444.9	57.1		0.3	0.51	4.5	78.0
	0.2	0.49	821.6	52.8		0.2	0.50	344.8	57.9		0.2	0.46	3.2	77.5
	0.1	0.50	547.3	55.3		0.1	0.50	220.9	59.9		0.1	0.49	1.8	79.5
	1.59	0.48	1194.6	51.8		1.59	0.50	523.0	56.8		1.59	0.49	8.3	76.6
	10	0.45	3181.3	45.4		10	0.48	1554.5	51.5		10	0.45	36.7	71.6
	9	0.46	3049.2	45.8		9	0.49	1465.4	51.9		9	0.50	33.8	71.8
	8	0.46	2872.9	46.3		8	0.48	1373.3	52.3		8	0.50	30.8	72.1
	7	0.46	2671.8	46.8		7	0.48	1272.4	52.7		7	0.50	27.7	72.5
	6	0.47	2466.5	47.4		6	0.49	1163.1	53.2		6	0.50	24.5	72.9
	5	0.47	2243.0	48.1		5	0.49	1045.5	53.8		5	0.50	21.1	73.4
	4	0.47	1989.2	48.9		4	0.49	917.6	54.4		4	0.50	17.6	74.0
	3	0.48	1708.0	49.8		3	0.49	768.6	55.2		3	0.50	14.0	74.8
	2	0.48	1360.9	51.0		2	0.49	603.6	56.7		2	0.50	10.0	75.9
	1.59	0.49	1189.0	51.8		1.59	0.50	522.7	57.1		1.59	0.50	8.2	76.5
	1	0.49	907.7	53.4		1	0.50	390.1	58.2		1	0.52	5.6	77.7
	0.9	0.49	858.1	53.8		0.9	0.50	364.8	58.5		0.9	0.50	5.1	78.3
46.0	0.8	0.49	800.7	54.1	64.0	0.8	0.50	338.5	58.8	82.0	0.8	0.50	4.6	78.2
	0.7	0.49	739.8	54.5		0.7	0.50	310.6	59.1		0.7	0.50	4.1	78.7
	0.6	0.49	675.1	54.8		0.6	0.50	280.9	59.6		0.6	0.50	3.6	79.1
	0.5	0.49	605.1	55.0		0.5	0.50	249.3	60.1		0.5	0.50	3.1	79.5
	0.4	0.49	529.1	55.8		0.4	0.50	215.4	60.6		0.4	0.50	2.5	80.0
	0.3	0.49	444.9	57.1		0.3	0.50	177.7	61.4		0.3	0.49	2.0	80.4
	0.2	0.50	344.8	57.9		0.2	0.50	135.0	62.5		0.2	0.51	1.4	81.1
	0.1	0.50	220.9	59.9		0.1	0.52	83.7	64.7		0.1	0.56	0.8	81.0
	1.59	0.50	523.0	56.8		1.59	0.50	222.0	61.4		1.59	0.48	3.9	79.6
	10	0.48	1554.5	51.5		10	0.49	727.7	56.6		10	0.45	18.5	74.3
	9	0.49	1465.4	51.9		9	0.50	680.8	57.0		9	0.48	16.8	74.8
	8	0.48	1373.3	52.3		8	0.49	633.4	57.3		8	0.49	15.3	75.2
	7	0.48	1272.4	52.7		7	0.49	583.0	57.7		7	0.49	13.7	75.5
	6	0.49	1163.1	53.2		6	0.50	528.8	58.1		6	0.50	12.1	76.0
	5	0.49	1045.5	53.8		5	0.49	470.8	58.5		5	0.49	10.4	76.5
	4	0.49	917.6	54.4		4	0.50	408.5	59.1		4	0.49	8.6	77.1
	3	0.49	768.6	55.2		3	0.50	337.4	59.8		3	0.50	6.7	77.9
	2	0.49	603.6	56.7		2	0.50	259.0	61.0		2	0.50	4.7	79.0
	1.59	0.50	522.7	57.1		1.59	0.50	221.9	61.4		1.59	0.50	3.9	79.6
	1	0.50	390.1	58.2		1	0.50	161.7	62.6		1	0.50	2.6	80.8
	0.9	0.50	364.8	58.5		0.9	0.50	150.5	62.9		0.9	0.50	2.3	81.0
	0.8	0.50	338.5	58.8		0.8	0.50	138.8	63.2		0.8	0.50	2.1	81.3
	0.7	0.50	310.6	59.1		0.7	0.50	126.5	63.5		0.7	0.50	1.9	81.5
	0.6	0.50	280.9	59.6		0.6	0.50	113.6	63.9		0.6	0.50	1.6	81.9
	0.5	0.50	249.3	60.1		0.5	0.50	99.9	64.4		0.5	0.50	1.4	82.2
	0.4	0.50	215.4	60.6		0.4	0.50	85.3	65.0		0.4	0.50	1.1	82.6
	0.3	0.50	177.7	61.4		0.3	0.50	69.4	65.8		0.3	0.50	0.9	83.1
	0.2	0.50	135.0	62.5		0.2	0.50	51.7	67.1		0.2	0.50	0.6	83.6
	0.1	0.52	83.7	64.7		0.1	0.50	30.8	69.1		0.1	0.28	0.4	83.0

Tableau A VII.34 Résultats DSR (diamètre 8 mm) RAP-5

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.14	3178.2	47.6	16.0	1.59	0.14	25808.0	33.5	-2.0	1.59	0.14	145476.6	21.3
	10	0.14	7964.5	43.5		10	0.14	48756.1	30.1		10	0.13	216238.1	18.0
	9	0.14	7566.9	43.5		9	0.14	47170.2	30.1		9	0.14	211055.5	18.1
	8	0.14	7139.8	43.8		8	0.14	45469.7	30.3		8	0.13	206584.2	18.3
	7	0.14	6682.7	44.1		7	0.14	43582.2	30.5		7	0.13	201513.0	18.5
	6	0.14	6188.4	44.5		6	0.14	41455.0	30.8		6	0.14	195588.6	18.7
	5	0.14	5646.4	45.0		5	0.14	39053.5	31.2		5	0.13	188944.9	19.0
	4	0.14	5042.9	45.5		4	0.14	36215.2	31.6		4	0.13	180326.0	19.3
	3	0.14	4351.1	46.2		3	0.14	32831.2	32.1		3	0.14	169644.3	19.8
	2	0.14	3521.1	47.2		2	0.14	28428.1	33.0		2	0.14	156214.3	19.9
	1.59	0.14	3115.0	47.7		1.59	0.14	26238.6	33.5		1.59	0.14	147463.9	20.4
	1	0.14	2424.0	48.9		1	0.14	22127.9	34.4		1	0.14	132028.8	21.5
	0.9	0.14	2284.1	49.1		0.9	0.14	21305.5	34.6		0.9	0.14	129696.4	21.7
	0.8	0.14	2137.2	49.4		0.8	0.14	20412.9	34.8		0.8	0.14	126123.4	21.8
	0.7	0.14	1981.6	49.8		0.7	0.14	19433.7	35.1		0.7	0.14	122200.8	22.0
	0.6	0.14	1815.7	50.2		0.6	0.14	18348.6	35.4		0.6	0.14	117700.0	22.3
	0.5	0.14	1636.7	50.6		0.5	0.14	17126.7	35.8		0.5	0.14	112580.9	22.7
	0.4	0.14	1440.4	51.2		0.4	0.14	15719.1	36.3		0.4	0.14	106551.5	23.2
	0.3	0.14	1219.7	51.9		0.3	0.14	14046.7	36.9		0.3	0.14	99237.7	23.8
	0.2	0.14	961.7	52.9		0.2	0.14	11939.8	37.9		0.2	0.14	89558.1	24.3
	0.1	0.14	625.3	54.3		0.1	0.14	8914.8	39.5		0.1	0.14	74456.4	25.7
28.0	1.59	0.14	6205.3	43.3	10.0	1.59	0.14	49060.4	28.9	-8.0	1.59	0.13	230065.9	17.3
	10	0.14	14268.0	39.3		10	0.14	84674.8	25.7		10	0.13	319382.9	14.4
	9	0.14	13651.8	39.3		9	0.14	82271.3	25.8		9	0.13	312549.0	14.4
	8	0.14	12994.5	39.5		8	0.14	79750.0	26.0		8	0.13	306574.6	14.7
	7	0.14	12272.9	39.8		7	0.14	76924.0	26.2		7	0.13	300609.4	14.8
	6	0.14	11482.4	40.2		6	0.14	73680.7	26.5		6	0.13	293716.5	15.1
	5	0.14	10603.2	40.7		5	0.14	70048.2	26.8		5	0.13	285532.2	15.4
	4	0.14	9601.9	41.1		4	0.14	65667.4	27.2		4	0.13	275426.8	15.7
	3	0.14	8427.1	41.8		3	0.14	60314.0	27.7		3	0.13	261568.9	16.1
	2	0.14	6981.5	42.7		2	0.14	53382.7	28.4		2	0.13	246711.3	16.6
	1.59	0.14	6269.1	43.3		1.59	0.14	49769.0	28.9		1.59	0.13	234919.5	16.6
	1	0.14	5014.2	44.4		1	0.14	43033.5	29.7		1	0.13	213110.2	17.6
	0.9	0.14	4767.3	44.6		0.9	0.14	41553.0	29.9		0.9	0.13	209927.3	18.0
	0.8	0.14	4504.3	44.9		0.8	0.14	40044.9	30.1		0.8	0.13	205605.4	18.1
	0.7	0.14	4221.0	45.2		0.7	0.14	38390.1	30.3		0.7	0.13	200558.3	18.3
	0.6	0.14	3912.5	45.6		0.6	0.14	36542.0	30.6		0.6	0.13	194473.8	18.5
	0.5	0.14	3572.7	46.0		0.5	0.14	34440.4	31.0		0.5	0.13	187557.9	18.7
	0.4	0.14	3193.1	46.5		0.4	0.14	31987.0	31.4		0.4	0.13	178787.6	19.0
	0.3	0.14	2756.2	47.2		0.3	0.14	29036.3	32.0		0.3	0.14	167616.8	19.7
	0.2	0.14	2230.5	48.2		0.2	0.14	25233.4	32.8		0.2	0.14	153009.7	20.6
	0.1	0.14	1534.3	50.0		0.1	0.14	19627.9	34.4		0.1	0.14	130837.5	21.7
22.0	1.59	0.14	12838.0	38.4	4.0	1.59	0.14	86848.0	24.8					
	10	0.14	26735.6	34.6		10	0.14	138550.2	21.7					
	9	0.14	25725.4	34.6		9	0.14	135168.3	21.9					
	8	0.14	24650.6	34.9		8	0.14	131639.4	22.0					
	7	0.14	23459.8	35.1		7	0.14	127728.9	22.2					
	6	0.14	22135.2	35.4		6	0.14	123199.5	22.5					
	5	0.14	20649.0	35.9		5	0.14	117896.7	22.7					
	4	0.14	18927.5	36.3		4	0.14	111766.5	23.2					
	3	0.14	16887.7	36.9		3	0.14	103851.4	23.6					
	2	0.14	14320.9	37.8		2	0.14	94012.4	24.0					
	1.59	0.14	13028.1	38.3		1.59	0.14	88101.5	24.5					
	1	0.14	10705.9	39.4		1	0.14	77650.9	25.5					
	0.9	0.14	10245.9	39.6		0.9	0.14	75481.2	25.6					
	0.8	0.14	9749.7	39.9		0.8	0.14	73069.7	25.8					
	0.7	0.14	9210.4	40.2		0.7	0.14	70406.2	26.0					
	0.6	0.14	8618.5	40.5		0.6	0.14	67435.7	26.3					
	0.5	0.14	7957.5	40.9		0.5	0.14	64046.2	26.7					
	0.4	0.14	7207.1	41.5		0.4	0.14	60166.5	27.1					
	0.3	0.14	6329.3	42.1		0.3	0.14	55425.1	27.6					
	0.2	0.14	5247.8	43.1		0.2	0.14	49124.2	28.3					
	0.1	0.14	3759.0	44.9		0.1	0.14	39550.6	29.8					

Tableau A VII.35 Résultats DSR (diamètre 4 mm) RAP-5

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
0.0	1.59	0.10	128720	23.5	-18.0	1.59	0.10	495212	11.6
	10	0.10	199356	20.5		10	0.10	606773	9.1
	9	0.10	195356	20.3		9	0.10	601428	9.2
	8	0.10	190688	20.5		8	0.10	595248	9.3
	7	0.10	185289	20.7		7	0.10	587695	9.5
	6	0.10	179147	21.0		6	0.10	578700	9.8
	5	0.10	172010	21.3		5	0.10	568145	10.0
	4	0.10	163395	21.7		4	0.10	554661	10.3
	3	0.10	152675	22.2		3	0.10	537103	10.7
	2	0.10	138325	22.9		2	0.10	511701	11.2
	1.59	0.10	130717	23.3		1.59	0.10	497192	11.5
	1	0.10	116056	24.2		1	0.10	468663	12.2
	0.9	0.10	113091	24.3		0.9	0.10	462294	12.4
	0.8	0.10	109803	24.6		0.8	0.10	455119	12.5
	0.7	0.10	106091	24.8		0.7	0.10	447062	12.7
	0.6	0.10	101929	25.1		0.6	0.10	437920	12.9
	0.5	0.10	97149	25.4		0.5	0.10	427018	13.2
	0.4	0.10	91479	25.8		0.4	0.10	413791	13.5
	0.3	0.10	84496	26.4		0.3	0.10	396853	13.9
	0.2	0.10	75323	27.3		0.2	0.10	373206	14.5
	0.1	0.10	61113	28.9		0.1	0.10	333394	15.6
-6.0	1.59	0.10	220482	19.0	-24.0	1.59	0.10	634996	8.9
	10	0.10	312791	16.1		10	0.10	738496	6.7
	9	0.10	307670	16.2		9	0.10	734589	6.8
	8	0.10	301524	16.5		8	0.10	729485	6.9
	7	0.10	294657	16.6		7	0.10	723069	7.1
	6	0.10	286618	16.8		6	0.10	715082	7.3
	5	0.10	277291	17.1		5	0.10	705852	7.5
	4	0.10	265941	17.5		4	0.10	693450	7.8
	3	0.10	251544	17.9		3	0.10	677428	8.1
	2	0.10	232141	18.6		2	0.10	653523	8.4
	1.59	0.10	221512	19.0		1.59	0.10	638773	8.7
	1	0.10	200819	19.7		1	0.10	610479	9.4
	0.9	0.10	196363	19.9		0.9	0.10	605344	9.5
	0.8	0.10	191473	20.1		0.8	0.10	598269	9.7
	0.7	0.10	186029	20.3		0.7	0.10	590298	9.9
	0.6	0.10	179795	20.6		0.6	0.10	580881	10.1
	0.5	0.10	172628	20.9		0.5	0.10	569665	10.4
	0.4	0.10	164144	21.2		0.4	0.10	556203	10.6
	0.3	0.10	153549	21.7		0.3	0.10	538361	11.0
	0.2	0.10	139367	22.5		0.2	0.10	513147	11.6
	0.1	0.10	117077	23.8		0.1	0.10	469646	12.6
-12.0	1.59	0.10	342786	15.1	-30.0	1.59	0.10	758723	6.8
	10	0.10	451026	12.5		10	0.10	847780	5.0
	9	0.10	445034	12.5		9	0.10	845479	5.0
	8	0.10	438320	12.7		8	0.10	841456	5.2
	7	0.10	430593	12.9		7	0.10	836003	5.3
	6	0.10	421434	13.1		6	0.10	828938	5.4
	5	0.10	410933	13.4		5	0.10	821427	5.6
	4	0.10	397727	13.7		4	0.10	810905	5.7
	3	0.10	380780	14.2		3	0.10	798297	6.1
	2	0.10	357245	14.8		2	0.10	775309	6.3
	1.59	0.10	344403	15.1		1.59	0.10	761536	6.6
	1	0.10	318567	15.8		1	0.10	736277	7.3
	0.9	0.10	312784	16.0		0.9	0.10	732171	7.3
	0.8	0.10	306579	16.2		0.8	0.10	725692	7.5
	0.7	0.10	299495	16.4		0.7	0.10	718085	7.6
	0.6	0.10	291464	16.6		0.6	0.10	709430	7.8
	0.5	0.10	282102	16.9		0.5	0.10	698975	8.1
	0.4	0.10	270703	17.2		0.4	0.10	686207	8.3
	0.3	0.10	256481	17.7		0.3	0.10	669110	8.7
	0.2	0.10	237077	18.3		0.2	0.10	644418	9.2
	0.1	0.10	205625	19.5		0.1	0.10	600430	10.1

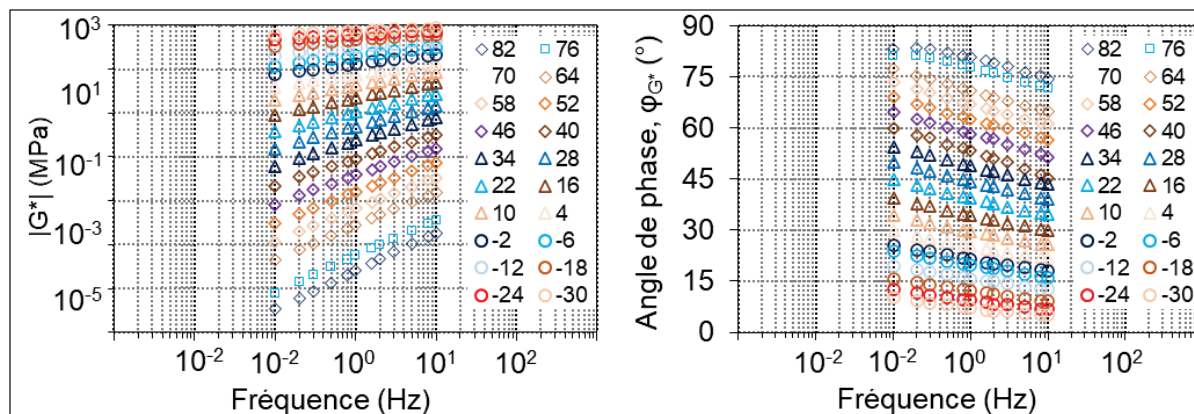


Figure A VII.19 Courbes isothermes RAP-5

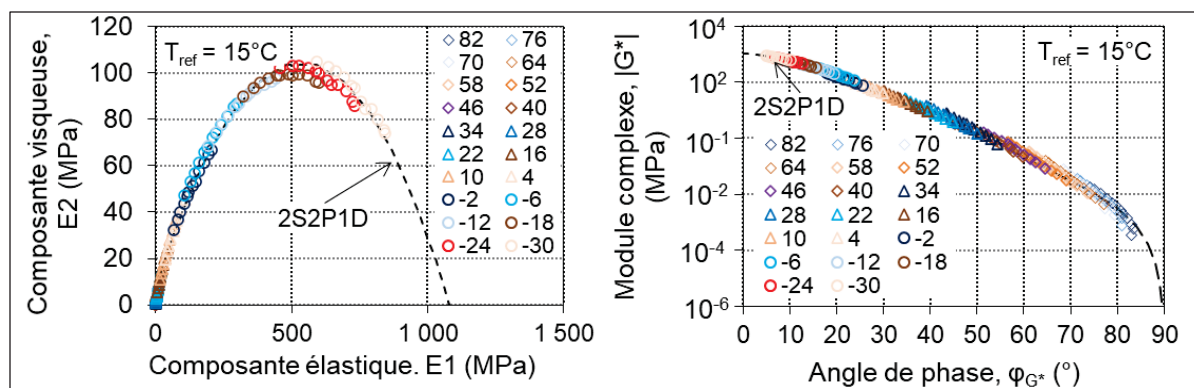


Figure A VII.20 Plans Cole-Cole et black RAP-5

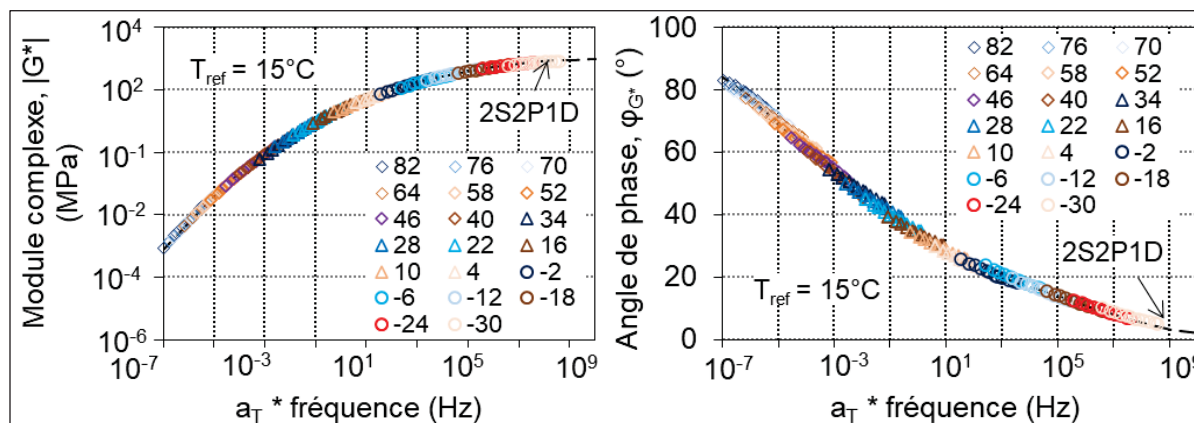


Figure A VII.21 Courbes maîtresses RAP-5

Tableau A VII.36 Paramètres 2S2P1D RAP-5

2S2P1D ($T_{ref} : 15^{\circ}\text{C}$)						
G00 (MPa): 0	G0 (MPa): 1080	k: 0.241	h: 0.600	δ : 8.890	β : 843	C1: 24.5 C2: 184
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		82.0	76.0	70.0	64.0	58.0
Tau		5.21E-10	1.34E-09	3.72E-09	1.04E-08	3.17E-08
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		52.0	46.0	40.0	34.0	28.0
Tau		1.12E-07	4.17E-07	1.64E-06	9.67E-06	3.72E-05
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		22.0	15.0	10.0	4.0	-2.0
Tau		1.93E-04	1.49E-03	8.18E-03	5.95E-02	5.21E-01
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		-6.0	-12.0	-18.0	-24.0	-30.0
Tau		3.72E+00	3.72E+01	5.95E+02	5.65E+03	5.65E+04

Tableau A VII.37 Résultats DSR (diamètre 25 mm) RAP-6

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.48	1296.7	49.7	52.0	1.59	0.49	592.1	54.2	70.0	1.59	0.49	8.7	73.9
	10	0.45	3304.9	43.1		10	0.48	1674.7	49.2		10	0.45	37.3	69.4
	9	0.46	3159.3	43.5		9	0.48	1592.0	49.5		9	0.50	34.4	69.6
	8	0.46	3001.9	44.0		8	0.48	1495.2	49.9		8	0.50	31.4	69.9
	7	0.46	2783.9	44.5		7	0.48	1386.9	50.3		7	0.50	28.3	70.2
	6	0.47	2597.6	45.1		6	0.49	1275.9	50.8		6	0.50	25.1	70.5
	5	0.47	2358.3	45.7		5	0.48	1151.4	51.3		5	0.50	21.8	71.0
	4	0.47	2112.7	46.5		4	0.49	1015.6	52.0		4	0.50	18.3	71.6
	3	0.48	1827.8	47.4		3	0.49	855.4	52.7		3	0.50	14.5	72.2
	2	0.48	1473.6	48.3		2	0.49	679.1	54.2		2	0.50	10.5	73.2
	1.59	0.48	1293.2	49.1		1.59	0.49	591.2	54.6		1.59	0.50	8.7	73.8
	1	0.49	1002.9	50.9		1	0.50	448.2	55.6		1	0.51	6.0	74.8
	0.9	0.49	951.8	51.1		0.9	0.50	420.7	55.9		0.9	0.50	5.5	75.5
	0.8	0.49	891.0	51.4		0.8	0.49	391.7	56.1		0.8	0.50	4.9	75.6
	0.7	0.49	825.4	51.9		0.7	0.50	360.7	56.5		0.7	0.50	4.4	76.0
	0.6	0.49	756.3	52.4		0.6	0.50	327.7	56.9		0.6	0.50	3.9	76.4
	0.5	0.49	683.6	52.9		0.5	0.50	292.6	57.5		0.5	0.50	3.3	76.8
40.0	0.4	0.50	603.1	53.2	58.0	0.4	0.50	254.2	57.9	76.0	0.4	0.49	2.7	77.4
	0.3	0.49	509.4	54.1		0.3	0.50	211.6	58.6		0.3	0.48	2.1	77.6
	0.2	0.49	400.1	55.3		0.2	0.50	162.7	59.6		0.2	0.49	1.5	79.0
	0.1	0.53	267.8	54.0		0.1	0.51	102.9	61.6		0.1	0.49	0.8	80.3
	1.59	0.49	592.1	54.2		1.59	0.50	252.7	59.0		1.59	0.48	4.1	76.7
	10	0.48	1674.7	49.2		10	0.49	790.8	54.5		10	0.44	18.7	72.0
	9	0.48	1592.0	49.5		9	0.50	744.0	54.7		9	0.48	17.2	72.5
	8	0.48	1495.2	49.9		8	0.49	694.1	55.1		8	0.49	15.7	72.8
	7	0.48	1386.9	50.3		7	0.49	640.2	55.4		7	0.49	14.1	73.1
	6	0.49	1275.9	50.8		6	0.50	583.7	55.8		6	0.50	12.4	73.4
	5	0.48	1151.4	51.3		5	0.49	521.7	56.3		5	0.49	10.7	73.9
	4	0.49	1015.6	52.0		4	0.49	454.9	56.8		4	0.49	8.9	74.4
	3	0.49	855.4	52.7		3	0.50	378.4	57.5		3	0.50	7.0	75.1
	2	0.49	679.1	54.2		2	0.50	293.7	58.5		2	0.50	5.0	76.1
	1.59	0.49	591.2	54.6		1.59	0.50	253.3	58.9		1.59	0.50	4.1	76.6
	1	0.50	448.2	55.6		1	0.49	186.7	60.1		1	0.50	2.8	77.7
	0.9	0.50	420.7	55.9		0.9	0.50	174.4	60.3		0.9	0.50	2.5	77.9
46.0	0.8	0.49	391.7	56.1	64.0	0.8	0.50	161.4	60.6	82.0	0.8	0.50	2.3	78.2
	0.7	0.50	360.7	56.5		0.7	0.50	147.7	60.8		0.7	0.50	2.0	78.5
	0.6	0.50	327.7	56.9		0.6	0.50	133.1	61.2		0.6	0.50	1.8	78.8
	0.5	0.50	292.6	57.5		0.5	0.50	117.7	61.7		0.5	0.50	1.5	79.1
	0.4	0.50	254.2	57.9		0.4	0.50	101.1	62.2		0.4	0.50	1.2	79.6
	0.3	0.50	211.6	58.6		0.3	0.50	82.9	62.9		0.3	0.50	1.0	80.0
	0.2	0.50	162.7	59.6		0.2	0.50	62.5	64.0		0.2	0.50	0.7	80.5
	0.1	0.51	102.9	61.6		0.1	0.50	38.1	65.6		0.1	0.32	0.4	80.1
	1.59	0.50	252.7	59.0		1.59	0.50	106.5	63.0		1.59	0.50	2.0	78.5
	10	0.49	790.8	54.5		10	0.50	363.7	58.7		10	0.45	9.7	74.5
	9	0.50	744.0	54.7		9	0.50	340.3	59.1		9	0.49	8.8	74.7
	8	0.49	694.1	55.1		8	0.50	315.6	59.4		8	0.49	8.0	75.0
	7	0.49	640.2	55.4		7	0.50	289.6	59.7		7	0.49	7.2	75.3
	6	0.50	583.7	55.8		6	0.50	261.7	60.0		6	0.49	6.3	75.7
	5	0.49	521.7	56.3		5	0.50	232.1	60.5		5	0.50	5.4	76.0
	4	0.49	454.9	56.8		4	0.50	199.9	61.0		4	0.49	4.5	76.6
	3	0.50	378.4	57.5		3	0.50	164.7	61.6		3	0.50	3.5	77.2
	2	0.50	293.7	58.5		2	0.50	125.0	62.4		2	0.50	2.5	78.1
	1.59	0.50	253.3	58.9		1.59	0.50	106.5	63.0		1.59	0.50	2.0	78.6
	1	0.49	186.7	60.1		1	0.50	77.0	64.1		1	0.50	1.3	79.5
	0.9	0.50	174.4	60.3		0.9	0.50	71.5	64.3		0.9	0.50	1.2	79.6
	0.8	0.50	161.4	60.6		0.8	0.50	65.7	64.6		0.8	0.50	1.1	79.8
	0.7	0.50	147.7	60.8		0.7	0.50	59.8	64.9		0.7	0.50	1.0	80.0
	0.6	0.50	133.1	61.2		0.6	0.50	53.5	65.3		0.6	0.50	0.9	80.2
	0.5	0.50	117.7	61.7		0.5	0.50	46.9	65.8		0.5	0.50	0.7	80.4
	0.4	0.50	101.1	62.2		0.4	0.50	39.9	66.3		0.4	0.50	0.6	80.6
	0.3	0.50	82.9	62.9		0.3	0.50	32.2	67.1		0.3	0.50	0.5	80.8
	0.2	0.50	62.5	64.0		0.2	0.50	23.8	68.2		0.2	0.50	0.3	80.8
	0.1	0.50	38.1	65.6		0.1	0.50	14.0	70.2		0.1	0.51	0.2	80.1

Tableau A VII.38 Résultats DSR (diamètre 8 mm) RAP-6

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.14	1901.2	47.8	16.0	1.59	0.14	15711.9	34.5	-2.0	1.59	0.14	93740.5	22.4
	10	0.14	4814.9	44.0		10	0.14	30375.2	31.3		10	0.14	143677.0	19.9
	9	0.15	4573.6	44.1		9	0.15	29347.8	31.2		9	0.14	140097.8	19.9
	8	0.14	4313.8	44.4		8	0.14	28258.5	31.4		8	0.14	136832.2	20.1
	7	0.14	4035.1	44.7		7	0.14	27040.0	31.7		7	0.14	133216.7	20.2
	6	0.15	3734.1	45.0		6	0.15	25674.7	31.9		6	0.14	128861.9	20.5
	5	0.14	3404.3	45.5		5	0.14	24130.0	32.3		5	0.14	124002.2	20.7
	4	0.14	3037.7	45.9		4	0.14	22328.8	32.7		4	0.14	117917.3	21.0
	3	0.14	2617.3	46.6		3	0.14	20155.8	33.2		3	0.14	110410.2	21.4
	2	0.14	2115.1	47.5		2	0.14	17410.5	33.9		2	0.14	100716.1	21.6
	1.59	0.14	1869.9	48.0		1.59	0.14	16006.5	34.3		1.59	0.14	94999.9	22.1
	1	0.14	1454.0	49.0		1	0.14	13433.0	35.3		1	0.14	84864.7	23.0
	0.9	0.14	1370.1	49.3		0.9	0.14	12925.1	35.5		0.9	0.14	82823.1	23.1
	0.8	0.14	1281.7	49.5		0.8	0.14	12373.3	35.7		0.8	0.14	80476.7	23.3
	0.7	0.14	1188.2	49.8		0.7	0.14	11770.3	35.9		0.7	0.14	77898.6	23.5
	0.6	0.14	1088.3	50.2		0.6	0.14	11100.6	36.2		0.6	0.14	75003.6	23.7
	0.5	0.14	980.5	50.6		0.5	0.14	10349.7	36.6		0.5	0.14	71689.6	24.0
28.0	0.4	0.14	862.2	51.1	10.0	0.4	0.14	9482.4	37.1	-8.0	0.4	0.14	67762.5	24.3
	0.3	0.14	729.3	51.8		0.3	0.14	8452.6	37.7		0.3	0.14	62886.3	24.7
	0.2	0.15	573.4	53.2		0.2	0.14	7161.1	38.6		0.2	0.14	56448.0	25.3
	0.1	0.15	377.8	54.4		0.1	0.14	5322.3	40.2		0.1	0.14	46575.8	26.5
	1.59	0.14	3746.5	44.0		1.59	0.14	30401.7	30.0		1.59	0.14	151791.4	19.0
	10	0.14	8769.1	40.1		10	0.14	53826.8	27.0		10	0.14	218457.5	16.5
	9	0.15	8378.0	40.2		9	0.14	52224.0	27.1		9	0.14	213616.4	16.5
	8	0.14	7961.3	40.4		8	0.14	50561.5	27.3		8	0.14	209499.1	16.6
	7	0.14	7508.7	40.7		7	0.14	48682.1	27.5		7	0.14	205015.1	16.9
	6	0.15	7012.6	41.0		6	0.14	46548.4	27.7		6	0.14	199302.9	17.1
	5	0.14	6461.5	41.4		5	0.14	44138.8	28.1		5	0.14	193286.6	17.4
	4	0.14	5836.7	41.9		4	0.14	41256.0	28.4		4	0.14	184931.5	17.6
	3	0.14	5107.6	42.5		3	0.14	37768.6	28.9		3	0.14	176202.3	18.0
	2	0.14	4216.4	43.4		2	0.14	33260.7	29.5		2	0.14	161665.1	18.3
	1.59	0.14	3776.7	43.9		1.59	0.14	30888.3	29.9		1.59	0.14	153669.1	18.9
	1	0.14	3008.9	45.0		1	0.14	26569.6	30.6		1	0.14	139604.2	19.6
	0.9	0.14	2857.4	45.2		0.9	0.14	25693.9	30.8		0.9	0.14	136869.0	19.7
	0.8	0.14	2696.4	45.4		0.8	0.14	24744.3	31.0		0.8	0.14	133579.7	19.8
22.0	0.7	0.14	2523.2	45.7	4.0	0.7	0.14	23693.5	31.3		0.7	0.14	129896.7	20.0
	0.6	0.14	2335.3	46.1		0.6	0.14	22521.0	31.5		0.6	0.14	125719.6	20.3
	0.5	0.14	2128.9	46.5		0.5	0.14	21188.4	31.9		0.5	0.14	120941.7	20.5
	0.4	0.14	1898.8	47.0		0.4	0.14	19641.1	32.3		0.4	0.14	115182.8	20.8
	0.3	0.14	1634.9	47.7		0.3	0.14	17772.7	32.8		0.3	0.14	108001.1	21.2
	0.2	0.14	1319.1	48.6		0.2	0.14	15392.6	33.6		0.2	0.14	98284.8	21.7
	0.1	0.14	903.9	50.3		0.1	0.14	11896.5	35.1		0.1	0.14	83167.8	22.8
	1.59	0.14	7673.0	39.3		1.59	0.14	54876.6	25.9					
	10	0.14	16331.4	35.4		10	0.14	89962.9	23.4					
	9	0.15	15694.2	35.7		9	0.14	87601.9	23.4					
	8	0.14	15015.7	36.0		8	0.14	85160.2	23.6					
	7	0.14	14266.4	36.2		7	0.14	82420.8	23.8					
	6	0.15	13436.8	36.5		6	0.14	79320.0	24.0					
	5	0.14	12503.5	36.9		5	0.14	75792.3	24.2					
	4	0.14	11437.5	37.3		4	0.14	71483.5	24.6					
	3	0.14	10172.6	37.9		3	0.14	66216.4	25.0					
	2	0.14	8585.8	38.7		2	0.14	59413.0	25.5					
	1.59	0.14	7793.4	39.2		1.59	0.14	55712.2	26.0					
	1	0.14	6373.3	40.2		1	0.14	48912.9	26.7					
	0.9	0.14	6093.3	40.4		0.9	0.14	47420.3	26.8					
	0.8	0.14	5792.5	40.7		0.8	0.14	45880.7	27.0					
	0.7	0.14	5465.7	41.0		0.7	0.14	44186.2	27.2					
	0.6	0.14	5107.6	41.3		0.6	0.14	42308.5	27.4					
	0.5	0.14	4709.2	41.7		0.5	0.14	40139.6	27.7					
	0.4	0.14	4257.4	42.2		0.4	0.14	37585.0	28.1					
	0.3	0.14	3730.7	42.8		0.3	0.14	34481.6	28.5					
	0.2	0.14	3083.4	43.8		0.2	0.14	30448.3	29.3					
	0.1	0.14	2198.4	45.4		0.1	0.14	24377.3	30.6					

Tableau A VII.39 Résultats DSR (diamètre 4 mm) RAP-6

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
0.0	1.59	0.100	98096	24.8	-18.0	1.59	0.099	412656	13.4
	10	0.099	156826	21.9		10	0.098	526119	11.1
	9	0.100	153142	22.0		9	0.099	519834	11.1
	8	0.100	149081	22.1		8	0.098	513268	11.3
	7	0.100	144563	22.3		7	0.098	505299	11.4
	6	0.101	139326	22.5		6	0.099	495888	11.6
	5	0.099	133354	22.8		5	0.098	484814	11.9
	4	0.099	126193	23.2		4	0.098	471088	12.2
	3	0.100	117336	23.7		3	0.099	453198	12.5
	2	0.100	105575	24.3		2	0.098	428375	13.1
	1.59	0.100	99377	24.7		1.59	0.099	414499	13.5
	1	0.100	87578	25.5		1	0.099	386974	14.1
	0.9	0.100	85156	25.7		0.9	0.099	380772	14.2
	0.8	0.100	82498	25.9		0.8	0.099	373944	14.3
	0.7	0.100	79549	26.1		0.7	0.099	366245	14.5
	0.6	0.100	76231	26.4		0.6	0.099	357416	14.7
	0.5	0.100	72429	26.7		0.5	0.099	347110	15.0
	0.4	0.100	67931	27.2		0.4	0.099	334671	15.3
	0.3	0.100	62457	27.7		0.3	0.099	318970	15.7
	0.2	0.100	55291	28.5		0.2	0.099	297381	16.3
	0.1	0.100	44410	30.1		0.1	0.099	262101	17.4
-6.0	1.59	0.100	170860	20.6	-24.0	1.59	0.098	548503	10.7
	10	0.099	251221	18.1		10	0.098	661813	8.5
	9	0.100	246398	18.0		9	0.098	656611	8.5
	8	0.099	241023	18.2		8	0.098	650586	8.6
	7	0.099	234908	18.4		7	0.099	643065	8.8
	6	0.100	227848	18.6		6	0.099	633731	9.0
	5	0.100	219586	18.9		5	0.098	623238	9.2
	4	0.099	209565	19.2		4	0.098	609600	9.5
	3	0.100	197305	19.6		3	0.098	591344	9.8
	2	0.099	180453	20.3		2	0.098	567172	10.3
	1.59	0.100	171661	20.6		1.59	0.098	551727	10.7
	1	0.100	154426	21.3		1	0.098	521980	11.3
	0.9	0.100	150718	21.4		0.9	0.098	515488	11.4
	0.8	0.099	146658	21.6		0.8	0.098	508056	11.6
	0.7	0.100	142195	21.8		0.7	0.098	499715	11.8
	0.6	0.100	137099	22.1		0.6	0.098	490099	12.0
	0.5	0.099	131232	22.4		0.5	0.098	478645	12.2
	0.4	0.100	124310	22.7		0.4	0.098	464853	12.5
	0.3	0.099	115739	23.2		0.3	0.098	447057	12.9
	0.2	0.100	104367	23.9		0.2	0.098	422273	13.4
	0.1	0.100	86700	25.2		0.1	0.098	380277	14.5
-12.0	1.59	0.099	274354	16.9	-30.0	1.59	0.098	672725	8.6
	10	0.099	374935	14.4		10	0.097	778268	6.4
	9	0.100	369079	14.4		9	0.098	773826	6.6
	8	0.099	362722	14.6		8	0.097	768842	6.7
	7	0.100	355324	14.8		7	0.098	762007	6.8
	6	0.100	346619	15.0		6	0.099	753435	7.0
	5	0.099	336566	15.2		5	0.097	744143	7.2
	4	0.099	324213	15.6		4	0.097	732049	7.5
	3	0.099	308544	16.0		3	0.098	714146	7.7
	2	0.099	287025	16.6		2	0.098	691585	8.2
	1.59	0.099	275445	16.9		1.59	0.098	677208	8.4
	1	0.099	252442	17.6		1	0.098	647353	9.1
	0.9	0.099	247310	17.7		0.9	0.098	641238	9.2
	0.8	0.099	241811	17.9		0.8	0.098	634110	9.4
	0.7	0.099	235684	18.1		0.7	0.098	625735	9.5
	0.6	0.099	228628	18.3		0.6	0.098	616016	9.7
	0.5	0.099	220551	18.5		0.5	0.098	604391	9.9
	0.4	0.099	210829	18.9		0.4	0.098	590003	10.2
	0.3	0.099	198683	19.3		0.3	0.098	571716	10.6
	0.2	0.099	182287	19.9		0.2	0.098	546001	11.1
	0.1	0.099	156244	21.0		0.1	0.098	500935	12.2

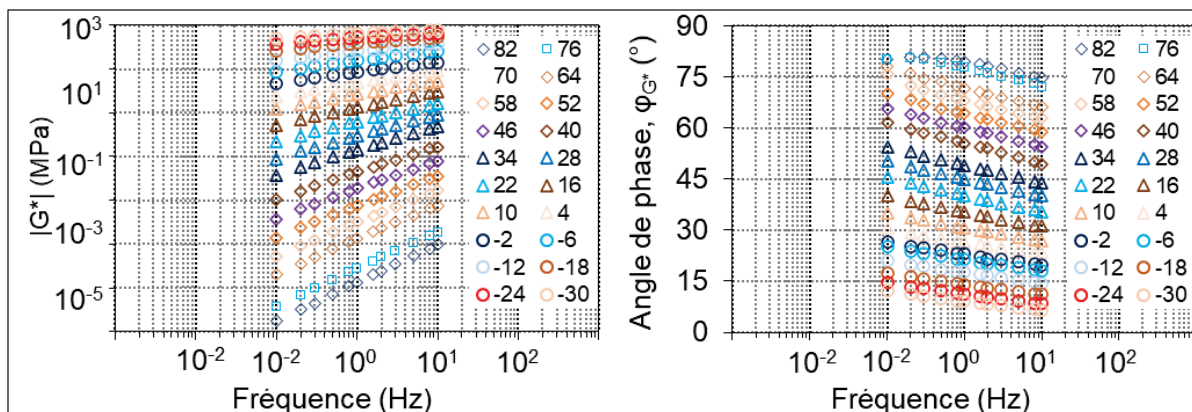


Figure A VII.22 Courbes isothermes RAP-6

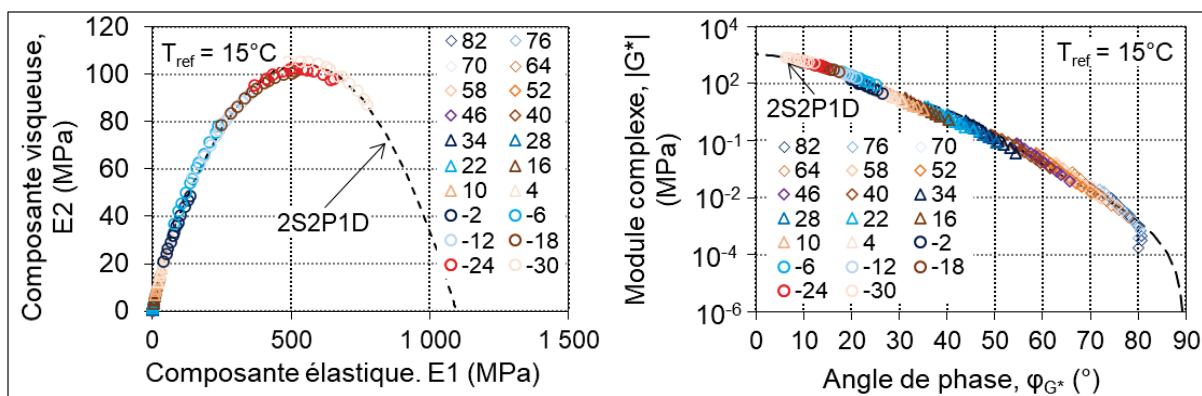


Figure A VII.23 Plans Cole-Cole et black RAP-6

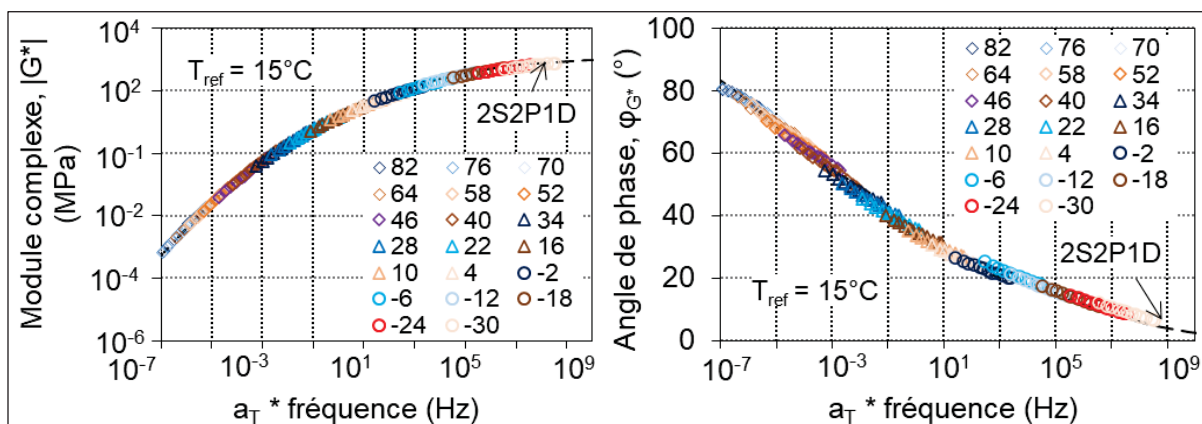


Figure A VII.24 Courbes maîtresses RAP-6

Tableau A VII.40 Paramètres 2S2P1D RAP-6

2S2P1D ($T_{ref} : 15^{\circ}C$)						
G00 (MPa): 0	G0 (MPa): 1095	k: 0.240	h: 0.604	δ : 8.810	β : 1180	C1: 26.6 C2: 198
Temperature ($^{\circ}C$)	82.0	76.0	70.0	64.0	58.0	
Tau	1.94E-10	4.64E-10	1.24E-09	3.33E-09	1.08E-08	
Temperature ($^{\circ}C$)	52.0	46.0	40.0	34.0	28.0	
Tau	3.64E-08	1.47E-07	5.42E-07	4.26E-06	1.78E-05	
Temperature ($^{\circ}C$)	22.0	15.0	10.0	4.0	-2.0	
Tau	9.29E-05	7.74E-04	3.87E-03	2.71E-02	1.94E-01	
Temperature ($^{\circ}C$)	-6.0	-12.0	-18.0	-24.0	-30.0	
Tau	2.13E+00	1.94E+01	2.71E+02	2.71E+03	2.71E+04	

Tableau A VII.41 Résultats DSR (diamètre 25 mm) RAP-7

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.98	955.0	52.9	52.0	1.59	0.99	427.8	57.4	70.0	1.59	1.00	7.3	75.2
	10	0.93	2642.3	47.1		10	0.97	1302.5	52.6		10	1.00	31.8	70.5
	9	0.94	2521.3	47.6		9	0.98	1227.1	53.0		9	1.01	29.3	70.9
	8	0.93	2374.3	48.0		8	0.97	1145.7	53.4		8	1.00	26.7	71.1
	7	0.94	2217.5	48.6		7	0.98	1059.6	53.8		7	1.00	24.1	71.4
	6	0.95	2034.5	49.1		6	0.99	966.0	54.2		6	1.01	21.3	71.8
	5	0.95	1847.6	49.8		5	0.98	868.5	54.8		5	1.00	18.5	72.3
	4	0.96	1626.1	50.4		4	0.98	757.8	55.3		4	1.00	15.4	72.8
	3	0.97	1381.4	51.2		3	0.99	635.7	56.0		3	1.00	12.2	73.5
	2	0.97	1092.7	52.4		2	0.99	495.2	57.3		2	1.00	8.8	74.5
	1.59	0.98	952.2	53.3		1.59	0.99	428.1	57.6		1.59	1.00	7.3	75.1
	1	0.98	730.3	54.7		1	0.99	319.4	58.6		1	1.00	4.9	76.4
	0.9	0.98	684.0	54.6		0.9	0.99	297.8	58.8		0.9	1.00	4.5	76.7
	0.8	0.98	636.7	54.8		0.8	0.99	275.9	59.1		0.8	1.00	4.1	77.0
	0.7	0.98	588.4	55.2		0.7	1.00	253.0	59.5		0.7	1.00	3.6	77.3
40.0	0.6	0.99	538.1	55.7	58.0	0.6	0.99	228.9	59.8	76.0	0.6	1.00	3.2	77.8
	0.5	0.99	482.6	56.1		0.5	1.00	203.3	60.1		0.5	1.00	2.7	78.3
	0.4	0.99	420.0	56.6		0.4	1.00	175.4	60.7		0.4	0.99	2.2	78.8
	0.3	0.99	350.5	57.4		0.3	1.00	144.9	61.3		0.3	0.99	1.7	79.8
	0.2	0.99	271.9	58.3		0.2	1.00	110.1	62.2		0.2	1.00	1.2	80.7
	0.1	1.00	173.9	60.0		0.1	1.04	68.1	63.8		0.1	1.17	0.6	82.6
	1.59	0.99	427.8	57.4		1.59	1.00	184.9	61.6		1.59	0.96	3.5	78.0
	10	0.97	1302.5	52.6		10	0.99	611.4	57.2		10	0.89	16.3	73.4
	9	0.98	1227.1	53.0		9	1.00	572.6	57.7		9	0.97	15.0	73.6
	8	0.97	1145.7	53.4		8	0.99	531.9	58.0		8	0.97	13.6	73.8
	7	0.98	1059.6	53.8		7	0.99	488.3	58.3		7	0.98	12.2	74.2
	6	0.99	966.0	54.2		6	1.00	442.8	58.7		6	0.99	10.8	74.5
	5	0.98	868.5	54.8		5	0.99	393.7	59.1		5	0.99	9.3	75.0
	4	0.98	757.8	55.3		4	0.99	341.1	59.5		4	0.98	7.7	75.6
	3	0.99	635.7	56.0		3	1.00	282.4	60.2		3	1.00	6.0	76.3
	2	0.99	495.2	57.3		2	1.00	215.7	61.1		2	1.00	4.3	77.3
46.0	1.59	0.99	428.1	57.6	64.0	1.59	1.00	185.2	61.5	82.0	1.59	1.00	3.5	77.9
	1	0.99	319.4	58.6		1	1.00	135.1	62.5		1	1.00	2.3	79.2
	0.9	0.99	297.8	58.8		0.9	1.00	125.5	62.7		0.9	1.00	2.1	79.4
	0.8	0.99	275.9	59.1		0.8	1.00	115.8	63.0		0.8	1.00	1.9	79.7
	0.7	1.00	253.0	59.5		0.7	1.00	105.6	63.3		0.7	1.00	1.7	80.0
	0.6	0.99	228.9	59.8		0.6	1.00	94.9	63.6		0.6	1.00	1.5	80.4
	0.5	1.00	203.3	60.1		0.5	1.00	83.5	64.0		0.5	1.00	1.3	80.9
	0.4	1.00	175.4	60.7		0.4	1.00	71.3	64.6		0.4	0.98	1.0	81.5
	0.3	1.00	144.9	61.3		0.3	1.00	58.1	65.2		0.3	0.99	0.8	82.2
	0.2	1.00	110.1	62.2		0.2	1.00	43.3	66.3		0.2	1.01	0.5	83.2
	0.1	1.04	68.1	63.8		0.1	0.99	26.0	68.1		0.1	0.58	0.3	84.9
	1.59	1.00	184.9	61.6		1.59	1.00	79.9	65.1		1.59	1.00	1.7	80.4
	10	0.99	611.4	57.2		10	0.99	285.0	61.6		10	0.89	8.6	75.5
	9	1.00	572.6	57.7		9	1.00	265.6	61.6		9	0.97	7.9	76.0
	8	0.99	531.9	58.0		8	1.00	245.6	61.8		8	0.97	7.1	76.3
	7	0.99	488.3	58.3		7	1.00	224.3	62.1		7	0.98	6.4	76.6
46.0	6	1.00	442.8	58.7	64.0	6	1.01	202.1	62.4	82.0	6	0.99	5.6	77.0
	5	0.99	393.7	59.1		5	1.00	178.4	62.8		5	0.99	4.8	77.4
	4	0.99	341.1	59.5		4	1.00	153.1	63.2		4	0.98	3.9	78.0
	3	1.00	282.4	60.2		3	1.00	125.3	63.8		3	0.99	3.1	78.8
	2	1.00	215.7	61.1		2	1.00	94.1	64.6		2	1.00	2.1	79.8
	1.59	1.00	185.2	61.5		1.59	1.00	79.9	65.1		1.59	1.00	1.7	80.4
	1	1.00	135.1	62.5		1	1.00	57.2	66.2		1	1.00	1.2	81.5
	0.9	1.00	125.5	62.7		0.9	1.00	52.9	66.4		0.9	1.00	1.0	81.8
	0.8	1.00	115.8	63.0		0.8	1.00	48.6	66.7		0.8	1.00	0.9	82.0
	0.7	1.00	105.6	63.3		0.7	1.00	44.0	67.0		0.7	1.00	0.8	82.4
	0.6	1.00	94.9	63.6		0.6	1.00	39.3	67.4		0.6	1.00	0.7	82.7
	0.5	1.00	83.5	64.0		0.5	1.00	34.3	67.8		0.5	1.00	0.6	83.2
	0.4	1.00	71.3	64.6		0.4	1.00	29.0	68.4		0.4	1.00	0.5	83.7
	0.3	1.00	58.1	65.2		0.3	0.98	23.3	69.2		0.3	1.00	0.4	84.3
	0.2	1.00	43.3	66.3		0.2	1.00	17.1	70.3		0.2	0.99	0.3	85.1
	0.1	0.99	26.0	68.1		0.1	1.00	9.9	72.3		0.1	1.00	0.1	86.3

Tableau A VII.42 Résultats DSR (diamètre 8 mm) RAP-7

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.50	1134.8	53.9	16.0	1.59	0.50	12387.2	38.8	-2.0	1.59	0.49	81257.0	25.3
	10	0.50	3240.3	49.8		10	0.50	25668.0	35.0		10	0.49	130731.1	22.2
	9	0.50	3061.8	49.9		9	0.50	24663.4	35.1		9	0.49	127960.7	22.4
	8	0.50	2871.7	50.1		8	0.50	23612.2	35.3		8	0.49	124785.3	22.6
	7	0.50	2669.1	50.5		7	0.50	22450.2	35.6		7	0.49	120798.7	22.8
	6	0.51	2451.2	50.8		6	0.50	21163.3	36.0		6	0.49	116319.4	23.1
	5	0.50	2214.2	51.3		5	0.50	19730.0	36.3		5	0.49	111195.1	23.4
	4	0.50	1951.9	51.8		4	0.50	18079.3	36.9		4	0.49	105041.6	23.7
	3	0.50	1655.8	52.4		3	0.50	16113.3	37.4		3	0.49	97329.4	24.2
	2	0.50	1307.1	53.4		2	0.50	13654.1	38.3		2	0.49	87609.3	24.8
	1.59	0.50	1141.8	53.9		1.59	0.50	12410.9	38.8		1.59	0.49	81932.1	25.2
	1	0.50	864.3	54.9		1	0.50	10187.3	39.9		1	0.49	72014.4	26.2
	0.9	0.50	811.6	55.2		0.9	0.50	9740.4	40.1		0.9	0.49	69838.5	26.3
	0.8	0.50	756.0	55.4		0.8	0.50	9260.9	40.4		0.8	0.49	67494.8	26.5
	0.7	0.50	697.2	55.7		0.7	0.50	8739.3	40.7		0.7	0.49	64899.2	26.7
	0.6	0.50	634.6	56.0		0.6	0.50	8167.4	41.1		0.6	0.49	62031.7	27.0
	0.5	0.50	567.1	56.4		0.5	0.50	7532.2	41.5		0.5	0.49	58784.6	27.4
	0.4	0.50	493.7	56.9		0.4	0.50	6812.1	42.0		0.4	0.49	55034.0	27.8
	0.3	0.50	412.0	57.6		0.3	0.50	5970.9	42.7		0.3	0.50	50428.5	28.3
	0.2	0.50	318.3	58.5		0.2	0.50	4938.2	43.7		0.2	0.50	44419.5	29.0
	0.1	0.50	202.4	60.1		0.1	0.50	3526.0	45.5		0.1	0.50	35500.7	30.5
28.0	1.59	0.50	2630.3	49.0	10.0	1.59	0.50	24668.5	33.9	-8.0	1.59	0.49	136509.8	21.5
	10	0.50	6757.9	44.6		10	0.50	46550.4	30.3		10	0.48	204933.3	18.4
	9	0.50	6413.2	44.9		9	0.50	44994.0	30.5		9	0.48	201586.2	18.6
	8	0.50	6055.4	45.2		8	0.50	43344.3	30.7		8	0.48	197608.0	18.8
	7	0.50	5670.5	45.5		7	0.50	41485.2	31.0		7	0.48	192567.8	19.1
	6	0.50	5252.2	45.9		6	0.50	39409.5	31.3		6	0.48	186570.1	19.3
	5	0.50	4793.6	46.3		5	0.50	37084.9	31.6		5	0.48	179699.2	19.6
	4	0.50	4279.8	46.8		4	0.50	34348.4	32.1		4	0.48	171264.1	20.0
	3	0.50	3689.3	47.5		3	0.50	31054.8	32.6		3	0.48	160442.0	20.4
	2	0.50	2980.0	48.5		2	0.50	26894.3	33.6		2	0.48	147389.8	20.7
	1.59	0.50	2636.4	49.0		1.59	0.50	24767.9	34.0		1.59	0.49	138491.4	21.1
	1	0.50	2047.9	50.1		1	0.50	20846.6	34.9		1	0.49	123578.8	22.2
	0.9	0.50	1933.6	50.4		0.9	0.50	20042.6	35.1		0.9	0.49	121021.5	22.4
	0.8	0.50	1812.5	50.7		0.8	0.50	19182.9	35.4		0.8	0.49	117476.5	22.6
	0.7	0.50	1683.0	51.0		0.7	0.50	18241.1	35.6		0.7	0.49	113615.6	22.8
	0.6	0.50	1544.1	51.3		0.6	0.50	17198.6	36.0		0.6	0.49	109146.0	23.1
	0.5	0.50	1393.5	51.8		0.5	0.50	16028.1	36.4		0.5	0.49	104053.7	23.5
	0.4	0.50	1227.2	52.3		0.4	0.50	14684.0	36.9		0.4	0.49	98164.1	24.0
	0.3	0.50	1039.5	53.0		0.3	0.50	13091.3	37.5		0.3	0.49	90964.8	24.5
	0.2	0.50	819.7	53.9		0.2	0.50	11091.1	38.5		0.2	0.49	81498.7	25.0
	0.1	0.50	539.8	55.6		0.1	0.50	8263.0	40.2		0.1	0.49	67060.1	26.4
22.0	1.59	0.50	5844.8	43.9	4.0	1.59	0.50	45941.0	29.3					
	10	0.50	13456.9	39.8		10	0.49	79733.5	26.2					
	9	0.50	12859.1	39.9		9	0.50	77576.1	26.3					
	8	0.50	12227.4	40.2		8	0.49	75165.1	26.5					
	7	0.50	11538.8	40.5		7	0.49	72378.9	26.8					
	6	0.50	10785.2	40.9		6	0.50	69234.4	27.0					
	5	0.50	9948.7	41.3		5	0.49	65683.0	27.4					
	4	0.50	9003.3	41.8		4	0.49	61463.9	27.7					
	3	0.50	7893.8	42.5		3	0.50	56309.1	28.3					
	2	0.50	6530.9	43.4		2	0.50	49608.1	29.1					
	1.59	0.50	5857.7	44.0		1.59	0.50	46155.4	29.6					
	1	0.50	4676.3	45.1		1	0.50	39769.5	30.3					
	0.9	0.50	4442.7	45.3		0.9	0.50	38388.9	30.5					
	0.8	0.50	4193.3	45.6		0.8	0.50	36937.4	30.7					
	0.7	0.50	3925.2	45.9		0.7	0.50	35349.6	31.0					
	0.6	0.50	3634.9	46.3		0.6	0.50	33587.6	31.3					
	0.5	0.50	3315.1	46.7		0.5	0.50	31578.6	31.6					
	0.4	0.50	2957.7	47.3		0.4	0.50	29247.3	32.1					
	0.3	0.50	2547.6	48.0		0.3	0.50	26454.5	32.7					
	0.2	0.50	2055.5	49.0		0.2	0.50	22891.6	33.5					
	0.1	0.50	1407.2	50.7		0.1	0.50	17722.9	35.2					

Tableau A VII.43 Résultats DSR (diamètre 4 mm) RAP-7

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
0.0	1.59	0.100	98095.7	24.8	-18.0	1.59	0.099	412656.2	13.4
	10	0.099	156825.9	21.9		10	0.098	526118.8	11.1
	9	0.100	153142.0	22.0		9	0.099	519833.8	11.1
	8	0.100	149080.5	22.1		8	0.098	513268.0	11.3
	7	0.100	144562.9	22.3		7	0.098	505299.1	11.4
	6	0.101	139326.0	22.5		6	0.099	495888.3	11.6
	5	0.099	133353.7	22.8		5	0.098	484813.9	11.9
	4	0.099	126192.7	23.2		4	0.098	471088.4	12.2
	3	0.100	117336.0	23.7		3	0.099	453197.6	12.5
	2	0.100	105575.4	24.3		2	0.098	428374.7	13.1
	1.59	0.100	99377.3	24.7		1.59	0.099	414499.3	13.5
	1	0.100	87578.2	25.5		1	0.099	386973.8	14.1
	0.9	0.100	85156.1	25.7		0.9	0.099	380771.5	14.2
	0.8	0.100	82498.3	25.9		0.8	0.099	373944.1	14.3
	0.7	0.100	79549.4	26.1		0.7	0.099	366245.3	14.5
	0.6	0.100	76231.2	26.4		0.6	0.099	357416.5	14.7
	0.5	0.100	72429.1	26.7		0.5	0.099	347110.0	15.0
	0.4	0.100	67930.8	27.2		0.4	0.099	334671.1	15.3
	0.3	0.100	62456.6	27.7		0.3	0.099	318970.0	15.7
	0.2	0.100	55291.1	28.5		0.2	0.099	297380.8	16.3
	0.1	0.100	44410.4	30.1		0.1	0.099	262101.1	17.4
-6.0	1.59	0.100	170860.2	20.6	-24.0	1.59	0.098	548503.3	10.7
	10	0.099	251220.9	18.1		10	0.098	661813.0	8.5
	9	0.100	246397.6	18.0		9	0.098	656610.8	8.5
	8	0.099	241022.6	18.2		8	0.098	650585.7	8.6
	7	0.099	234908.5	18.4		7	0.099	643065.1	8.8
	6	0.100	227848.5	18.6		6	0.099	633731.2	9.0
	5	0.100	219585.5	18.9		5	0.098	623238.1	9.2
	4	0.099	209564.9	19.2		4	0.098	609600.2	9.5
	3	0.100	197305.1	19.6		3	0.098	591343.7	9.8
	2	0.099	180453.1	20.3		2	0.098	567171.7	10.3
	1.59	0.100	171661.2	20.6		1.59	0.098	551727.1	10.7
	1	0.100	154426.2	21.3		1	0.098	521979.9	11.3
	0.9	0.100	150718.4	21.4		0.9	0.098	515487.6	11.4
	0.8	0.099	146658.3	21.6		0.8	0.098	508056.5	11.6
	0.7	0.100	142195.4	21.8		0.7	0.098	499714.6	11.8
	0.6	0.100	137098.9	22.1		0.6	0.098	490099.0	12.0
	0.5	0.099	131232.4	22.4		0.5	0.098	478645.5	12.2
	0.4	0.100	124310.1	22.7		0.4	0.098	464853.0	12.5
	0.3	0.099	115738.9	23.2		0.3	0.098	447056.6	12.9
	0.2	0.100	104367.2	23.9		0.2	0.098	422273.1	13.4
	0.1	0.100	86700.3	25.2		0.1	0.098	380276.6	14.5
-12.0	1.59	0.099	274354.4	16.9	-30.0	1.59	0.098	672724.7	8.6
	10	0.099	374934.6	14.4		10	0.097	778267.9	6.4
	9	0.100	369078.7	14.4		9	0.098	773826.3	6.6
	8	0.099	362721.9	14.6		8	0.097	768841.7	6.7
	7	0.100	355324.5	14.8		7	0.098	762006.7	6.8
	6	0.100	346619.0	15.0		6	0.099	753435.3	7.0
	5	0.099	336566.5	15.2		5	0.097	744143.1	7.2
	4	0.099	324212.6	15.6		4	0.097	732049.2	7.5
	3	0.099	308544.2	16.0		3	0.098	714145.9	7.7
	2	0.099	287024.5	16.6		2	0.098	691585.4	8.2
	1.59	0.099	275445.4	16.9		1.59	0.098	677208.0	8.4
	1	0.099	252442.5	17.6		1	0.098	647353.2	9.1
	0.9	0.099	247309.6	17.7		0.9	0.098	641238.2	9.2
	0.8	0.099	241811.3	17.9		0.8	0.098	634110.1	9.4
	0.7	0.099	235683.7	18.1		0.7	0.098	625735.0	9.5
	0.6	0.099	228628.4	18.3		0.6	0.098	616016.2	9.7
	0.5	0.099	220550.5	18.5		0.5	0.098	604391.4	9.9
	0.4	0.099	210828.7	18.9		0.4	0.098	590003.4	10.2
	0.3	0.099	198682.9	19.3		0.3	0.098	571716.5	10.6
	0.2	0.099	182286.8	19.9		0.2	0.098	546001.0	11.1
	0.1	0.099	156244.4	21.0		0.1	0.098	500935.5	12.2

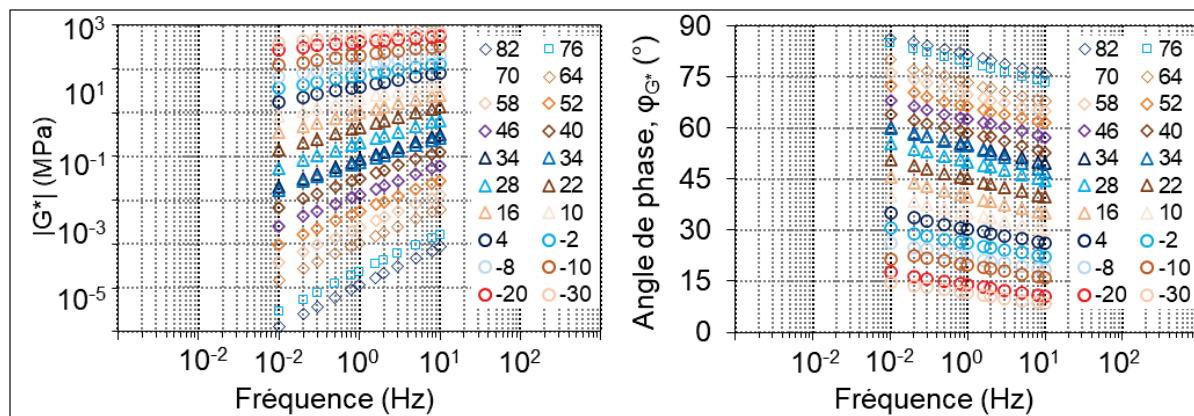


Figure A VII.25 Courbes isothermes RAP-7

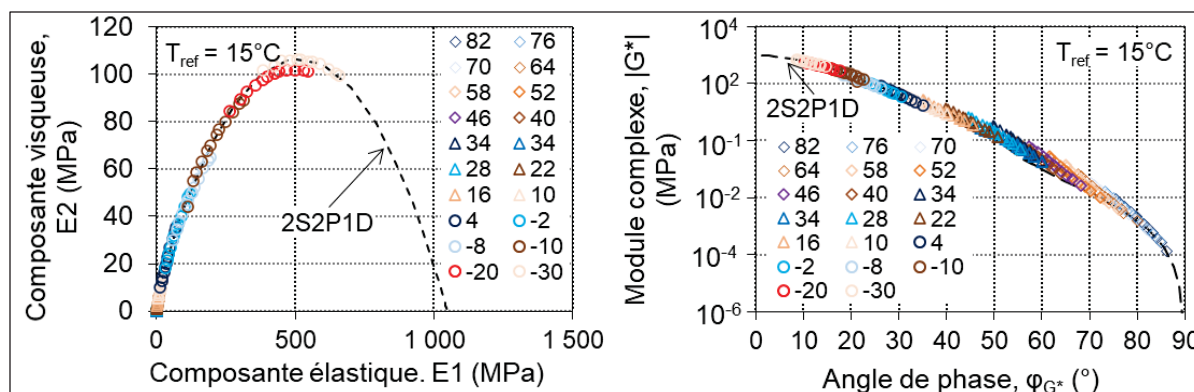


Figure A VII.26 Plans Cole-Cole et black RAP-7

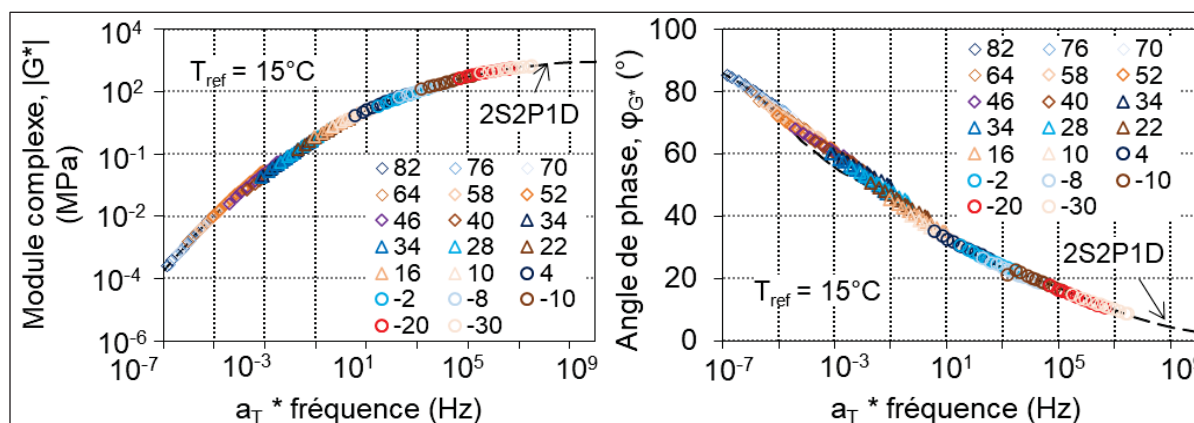


Figure A VII.27 Courbes maîtresses RAP-7

Tableau A VII.44 Paramètres 2S2P1D RAP-7

2S2P1D ($T_{ref} : 15^{\circ}\text{C}$)						
G00 (MPa): 0	G0 (MPa): 1048	k: 0.253	h: 0.587	δ : 7.701	β : 1881	C1: 22.3 C2: 172
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		82.0	76.0	70.0	64.0	58.0
Tau		1.15E-10	2.61E-10	6.14E-10	1.54E-09	4.61E-09
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		52.0	46.0	40.0	34.0	34.0
Tau		1.38E-08	6.14E-08	3.07E-07	1.38E-06	1.07E-06
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		28.0	15.0	16.0	10.0	4.0
Tau		6.14E-06	1.54E-04	1.38E-04	7.68E-04	5.37E-03
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		-2.0	-8.0	-10.0	-20.0	-30.0
Tau		4.61E-02	3.07E-01	2.30E+00	7.37E+01	4.76E+02

Tableau A VII.45 Résultats DSR (diamètre 25 mm) RAP-8

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.99	522.0	55.3	52.0	1.59	1.00	240.5	59.3	70.0	1.59	0.96	4.6	76.8
	10	0.96	1516.6	50.6		10	0.98	756.4	55.1		10	0.89	20.8	72.0
	9	0.97	1430.3	51.0		9	0.99	710.3	55.4		9	0.97	19.2	72.2
	8	0.96	1344.6	51.3		8	0.98	662.0	55.6		8	0.97	17.5	72.4
	7	0.97	1243.6	51.7		7	0.99	609.6	56.0		7	0.98	15.7	72.8
	6	0.98	1140.1	52.1		6	1.00	555.0	56.3		6	0.99	13.9	73.2
	5	0.97	1026.8	52.7		5	0.99	496.3	56.8		5	0.97	12.0	73.6
	4	0.98	903.6	53.2		4	0.99	432.2	57.3		4	0.98	10.0	74.2
	3	0.98	763.2	54.0		3	0.99	360.5	57.9		3	0.99	7.9	75.0
	2	0.98	597.5	55.0		2	0.99	278.7	59.0		2	1.00	5.6	76.0
	1.59	0.99	520.8	55.7		1.59	1.00	240.7	59.3		1.59	1.00	4.6	76.7
	1	0.99	392.1	56.4		1	1.00	177.5	60.3		1	1.00	3.1	77.9
	0.9	0.99	367.5	56.8		0.9	1.00	165.7	60.5		0.9	1.00	2.8	78.2
	0.8	0.99	342.3	57.1		0.8	1.00	153.4	60.8		0.8	1.00	2.6	78.5
	0.7	0.99	315.6	57.4		0.7	1.00	140.5	61.1		0.7	1.00	2.3	78.8
	0.6	1.00	286.6	57.7		0.6	1.00	126.7	61.4		0.6	1.00	2.0	79.2
	0.5	0.99	255.3	58.1		0.5	1.00	112.1	61.9		0.5	1.00	1.7	79.7
	0.4	1.00	221.7	58.6		0.4	1.00	96.4	62.4		0.4	1.00	1.4	80.3
	0.3	1.00	184.6	59.3		0.3	1.00	79.1	63.1		0.3	1.01	1.1	81.0
	0.2	1.00	142.0	60.3		0.2	1.00	59.7	64.2		0.2	0.99	0.7	81.9
	0.1	1.05	89.4	62.0		0.1	0.99	36.4	66.0		0.1	0.56	0.4	83.2
40.0	1.59	1.00	240.5	59.3	58.0	1.59	1.00	106.5	63.0	76.0	1.59	1.00	2.3	79.3
	10	0.98	756.4	55.1		10	0.99	361.6	58.9		10	0.89	10.9	74.4
	9	0.99	710.3	55.4		9	1.00	338.0	59.3		9	0.97	9.9	74.8
	8	0.98	662.0	55.6		8	0.99	313.4	59.5		8	0.97	9.0	75.1
	7	0.99	609.6	56.0		7	1.00	287.3	59.8		7	0.98	8.1	75.4
	6	1.00	555.0	56.3		6	1.00	259.9	60.1		6	0.99	7.1	75.8
	5	0.99	496.3	56.8		5	1.00	230.6	60.5		5	0.99	6.1	76.3
	4	0.99	432.2	57.3		4	1.00	199.0	61.0		4	0.98	5.0	76.8
	3	0.99	360.5	57.9		3	1.00	164.1	61.6		3	1.00	3.9	77.6
	2	0.99	278.7	59.0		2	1.00	124.7	62.5		2	1.00	2.8	78.6
	1.59	1.00	240.7	59.3		1.59	1.00	106.4	63.0		1.59	1.00	2.3	79.2
	1	1.00	177.5	60.3		1	1.00	77.1	64.1		1	1.00	1.5	80.4
	0.9	1.00	165.7	60.5		0.9	1.00	71.6	64.3		0.9	1.00	1.4	80.6
	0.8	1.00	153.4	60.8		0.8	1.00	65.9	64.6		0.8	1.00	1.2	80.9
	0.7	1.00	140.5	61.1		0.7	1.00	59.9	64.9		0.7	1.00	1.1	81.2
	0.6	1.00	126.7	61.4		0.6	1.00	53.7	65.3		0.6	1.00	0.9	81.6
	0.5	1.00	112.1	61.9		0.5	1.00	47.1	65.8		0.5	1.00	0.8	82.0
	0.4	1.00	96.4	62.4		0.4	1.00	40.1	66.4		0.4	1.01	0.7	82.5
	0.3	1.00	79.1	63.1		0.3	1.00	32.4	67.1		0.3	1.00	0.5	83.1
	0.2	1.00	59.7	64.2		0.2	1.00	24.0	68.3		0.2	1.00	0.3	83.9
	0.1	0.99	36.4	66.0		0.1	0.99	14.1	70.3		0.1	1.10	0.2	85.0
46.0	1.59	1.00	106.5	63.0	64.0	1.59	1.00	47.1	66.7	82.0	1.59	0.97	1.2	81.4
	10	0.99	361.6	58.9		10	1.00	172.6	62.7		10	0.89	5.8	77.0
	9	1.00	338.0	59.3		9	1.01	160.7	62.8		9	0.97	5.3	77.1
	8	0.99	313.4	59.5		8	1.00	148.4	63.1		8	0.97	4.8	77.4
	7	1.00	287.3	59.8		7	1.00	135.3	63.3		7	0.98	4.3	77.8
	6	1.00	259.9	60.1		6	1.01	121.6	63.7		6	0.99	3.8	78.1
	5	1.00	230.6	60.5		5	1.00	107.1	64.0		5	0.99	3.2	78.5
	4	1.00	199.0	61.0		4	1.00	91.5	64.6		4	0.98	2.6	79.2
	3	1.00	164.1	61.6		3	1.00	74.6	65.2		3	0.99	2.0	79.9
	2	1.00	124.7	62.5		2	1.00	55.7	66.1		2	1.00	1.4	80.8
	1.59	1.00	106.4	63.0		1.59	1.00	47.1	66.7		1.59	1.00	1.2	81.4
	1	1.00	77.1	64.1		1	1.00	33.4	67.8		1	1.00	0.8	82.4
	0.9	1.00	71.6	64.3		0.9	1.00	30.9	68.1		0.9	1.00	0.7	82.6
	0.8	1.00	65.9	64.6		0.8	1.00	28.3	68.4		0.8	1.00	0.6	82.9
	0.7	1.00	59.9	64.9		0.7	1.00	25.6	68.8		0.7	1.00	0.5	83.2
	0.6	1.00	53.7	65.3		0.6	1.00	22.7	69.2		0.6	1.00	0.5	83.5
	0.5	1.00	47.1	65.8		0.5	1.00	19.8	69.7		0.5	1.00	0.4	83.9
	0.4	1.00	40.1	66.4		0.4	0.99	16.7	70.3		0.4	1.00	0.3	84.3
	0.3	1.00	32.4	67.1		0.3	1.00	13.3	71.2		0.3	1.00	0.2	84.8
	0.2	1.00	24.0	68.3		0.2	1.00	9.7	72.3		0.2	0.99	0.2	85.5
	0.1	0.99	14.1	70.3		0.1	1.00	5.5	74.4		0.1	1.00	0.1	86.4

Tableau A VII.46 Résultats DSR (diamètre 8 mm) RAP-8

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
34.0	1.59	0.15	980.6	53.0	16.0	1.59	0.15	9140.6	40.2	-2.0	1.59	0.15	66266.6	27.1
	10	0.13	2781.0	49.6		10	0.15	19825.4	36.5		10	0.15	111128.0	24.2
	9	0.15	2617.9	49.6		9	0.15	19055.5	36.7		9	0.15	108152.5	24.4
	8	0.15	2453.9	49.8		8	0.15	18213.8	36.9		8	0.15	105002.3	24.5
	7	0.15	2273.8	50.1		7	0.15	17284.7	37.2		7	0.15	101430.4	24.8
	6	0.15	2090.4	50.4		6	0.15	16260.3	37.5		6	0.15	97480.0	25.0
	5	0.15	1874.6	50.8		5	0.15	15106.7	37.8		5	0.15	92843.9	25.3
	4	0.15	1651.8	51.2		4	0.15	13785.8	38.3		4	0.15	87435.5	25.6
	3	0.15	1404.5	51.8		3	0.15	12226.3	38.8		3	0.15	80723.9	26.0
	2	0.15	1105.5	52.6		2	0.15	10285.0	39.6		2	0.15	71973.3	26.7
	1.59	0.15	962.6	53.1		1.59	0.15	9317.7	40.1		1.59	0.15	67223.6	27.1
	1	0.15	733.3	53.8		1	0.15	7589.1	41.0		1	0.15	58670.3	28.0
	0.9	0.15	685.5	54.1		0.9	0.15	7250.8	41.2		0.9	0.15	56881.1	28.0
	0.8	0.15	636.7	54.4		0.8	0.15	6887.6	41.5		0.8	0.15	54938.7	28.1
	0.7	0.15	586.7	54.8		0.7	0.15	6494.5	41.7		0.7	0.15	52791.6	28.3
	0.6	0.15	533.7	55.1		0.6	0.15	6064.2	42.0		0.6	0.15	50382.1	28.6
	0.5	0.15	477.4	55.4		0.5	0.15	5584.6	42.4		0.5	0.15	47656.7	28.9
28.0	0.4	0.15	414.1	55.8	10.0	0.4	0.15	5042.4	42.9	-8.0	0.4	0.15	44503.2	29.3
	0.3	0.15	345.8	56.4		0.3	0.15	4410.6	43.5		0.3	0.15	40663.3	29.8
	0.2	0.15	267.2	57.3		0.2	0.15	3638.0	44.4		0.2	0.15	35679.2	30.5
	0.1	0.15	170.7	58.9		0.1	0.15	2584.5	45.9		0.1	0.15	28264.5	31.8
	1.59	0.15	1973.0	49.3		1.59	0.15	18865.0	35.6		1.59	0.15	114777.8	23.7
	10	0.15	5177.3	45.2		10	0.15	37273.7	32.0		10	0.14	179265.5	20.5
	9	0.15	4916.3	45.7		9	0.15	35954.7	32.3		9	0.15	174635.1	20.7
	8	0.15	4636.8	45.9		8	0.15	34565.3	32.5		8	0.14	170438.9	20.9
	7	0.15	4337.3	46.2		7	0.15	33021.5	32.7		7	0.15	165699.9	21.1
	6	0.15	4012.4	46.5		6	0.15	31302.7	33.0		6	0.15	160214.0	21.3
	5	0.15	3655.2	46.8		5	0.15	29352.8	33.3		5	0.15	153846.8	21.6
	4	0.15	3256.0	47.4		4	0.15	27085.6	33.7		4	0.15	145924.3	21.9
	3	0.15	2800.3	47.9		3	0.15	24385.8	34.2		3	0.15	136442.0	22.4
	2	0.15	2254.9	48.8		2	0.15	20920.3	35.0		2	0.15	123485.7	22.6
	1.59	0.15	1992.7	49.2		1.59	0.15	19199.5	35.4		1.59	0.15	116261.1	23.2
	1	0.15	1544.8	50.2		1	0.15	16033.2	36.3		1	0.15	103051.6	24.1
	0.9	0.15	1458.6	50.4		0.9	0.15	15402.5	36.5		0.9	0.15	100603.1	24.2
22.0	0.8	0.15	1367.4	50.6	4.0	0.8	0.15	14723.2	36.7		0.8	0.15	97586.8	24.4
	0.7	0.15	1270.4	50.9		0.7	0.15	13980.4	36.9		0.7	0.15	94250.9	24.6
	0.6	0.15	1165.9	51.2		0.6	0.15	13157.4	37.2		0.6	0.15	90492.5	24.9
	0.5	0.15	1052.5	51.6		0.5	0.15	12237.3	37.6		0.5	0.15	86276.9	25.2
	0.4	0.15	927.5	52.0		0.4	0.15	11181.9	38.0		0.4	0.15	81280.5	25.6
	0.3	0.15	786.6	52.6		0.3	0.15	9939.4	38.6		0.3	0.15	75134.7	25.9
	0.2	0.15	626.7	53.5		0.2	0.15	8381.8	39.5		0.2	0.15	67073.0	26.5
	0.1	0.15	412.1	54.9		0.1	0.15	6183.1	41.0		0.1	0.15	54794.3	27.7
	1.59	0.15	4227.8	45.0		1.59	0.15	36389.1	31.1					
	10	0.15	10117.7	41.1		10	0.15	65932.2	28.0					
	9	0.15	9670.4	41.3		9	0.15	63886.6	28.2					
	8	0.15	9181.6	41.5		8	0.15	61737.4	28.4					
	7	0.15	8650.2	41.8		7	0.15	59345.8	28.6					
	6	0.15	8068.4	42.1		6	0.15	56630.7	28.9					
	5	0.15	7420.7	42.4		5	0.15	53580.8	29.2					
	4	0.15	6691.1	43.0		4	0.15	49921.6	29.6					
	3	0.15	5840.1	43.5		3	0.15	45523.7	30.0					
	2	0.15	4802.8	44.4		2	0.15	39886.9	30.8					
	1.59	0.15	4295.9	44.9		1.59	0.15	37001.0	31.2					
	1	0.15	3409.5	45.8		1	0.15	31593.5	31.9					
	0.9	0.15	3238.2	46.0		0.9	0.15	30465.6	32.1					
	0.8	0.15	3055.2	46.3		0.8	0.15	29290.1	32.3					
	0.7	0.15	2859.0	46.5		0.7	0.15	27988.3	32.5					
	0.6	0.15	2645.6	46.9		0.6	0.15	26536.2	32.8					
	0.5	0.15	2411.4	47.2		0.5	0.15	24902.3	33.1					
	0.4	0.15	2149.8	47.7		0.4	0.15	23005.1	33.5					
	0.3	0.15	1850.2	48.3		0.3	0.15	20736.6	34.0					
	0.2	0.15	1492.0	49.2		0.2	0.15	17853.3	34.8					
	0.1	0.15	1020.5	50.7		0.1	0.15	13670.9	36.3					

Tableau A VII.47 Résultats DSR (diamètre 4 mm) RAP-8

T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)	T (°C)	f (Hz)	y* (%)	G* (kPa)	angle (°)
-2.0	1.59	0.010	104697	25.6	-20.0	1.59	0.010	452769	14.3
	10	0.009	168766	22.7		10	0.010	590930	11.6
	9	0.010	165062	22.8		9	0.010	582647	11.7
	8	0.010	160852	22.9		8	0.010	575085	11.8
	7	0.010	156084	23.2		7	0.010	565764	12.0
	6	0.010	150572	23.4		6	0.010	554754	12.2
	5	0.010	144087	23.7		5	0.010	541854	12.5
	4	0.010	136265	24.0		4	0.010	525999	12.8
	3	0.010	127116	24.9		3	0.010	504973	13.3
	2	0.009	114770	25.0		2	0.010	476450	13.8
	1.59	0.010	107638	25.4		1.59	0.010	460041	14.2
	1	0.010	94265	26.1		1	0.010	427404	14.9
	0.9	0.010	91977	26.2		0.9	0.010	420604	15.0
	0.8	0.010	90168	26.4		0.8	0.010	413505	15.2
	0.7	0.010	88584	26.6		0.7	0.010	405451	15.4
	0.6	0.010	85509	26.6		0.6	0.010	396016	15.6
	0.5	0.010	80940	26.7		0.5	0.010	384667	15.9
	0.4	0.010	74880	27.2		0.4	0.010	371207	16.1
	0.3	0.010	68190	27.8		0.3	0.010	353221	16.6
	0.2	0.010	60555	28.2		0.2	0.010	328466	17.4
	0.1	0.010	48770	29.9		0.1	0.010	288702	18.1
-8.0	1.59	0.010	189436	21.3	-26.0	1.59	0.010	597003	11.6
	10	0.010	283557	18.4		10	0.010	738482	9.1
	9	0.010	278271	18.6		9	0.010	729068	9.2
	8	0.010	272034	18.8		8	0.010	721504	9.4
	7	0.010	264948	18.9		7	0.010	712330	9.5
	6	0.010	256773	19.2		6	0.010	701098	9.7
	5	0.010	247248	19.4		5	0.010	688080	10.0
	4	0.010	235701	19.8		4	0.010	671802	10.3
	3	0.010	221290	20.2		3	0.010	650648	10.7
	2	0.010	201897	20.9		2	0.010	621560	11.1
	1.59	0.010	191542	21.2		1.59	0.010	602914	11.5
	1	0.010	171522	21.9		1	0.010	567230	12.2
	0.9	0.010	167532	22.0		0.9	0.010	560281	12.4
	0.8	0.010	163043	22.2		0.8	0.010	552286	12.6
	0.7	0.010	157897	22.4		0.7	0.010	543292	12.8
	0.6	0.010	152305	22.6		0.6	0.010	533305	13.0
	0.5	0.010	145670	22.9		0.5	0.010	520454	13.2
	0.4	0.010	137751	23.3		0.4	0.010	505080	13.5
	0.3	0.010	128126	23.7		0.3	0.010	484639	14.0
	0.2	0.010	115221	24.4		0.2	0.010	456382	14.6
	0.1	0.010	94793	24.1		0.1	0.010	408387	15.7
-14.0	1.59	0.010	316259	17.5	-32.0	1.59	0.010	747143	9.3
	10	0.010	437697	14.7		10	0.010	881427	6.9
	9	0.010	432004	14.8		9	0.010	872055	7.0
	8	0.010	424175	15.1		8	0.010	865460	7.2
	7	0.010	415344	15.2		7	0.010	856645	7.3
	6	0.010	405091	15.4		6	0.010	846101	7.5
	5	0.010	393031	15.7		5	0.010	833892	7.8
	4	0.010	377815	16.1		4	0.010	818747	8.0
	3	0.010	358922	16.5		3	0.010	798348	8.4
	2	0.010	332925	17.2		2	0.010	771801	8.8
	1.59	0.010	319070	17.5		1.59	0.010	752920	9.0
	1	0.010	291150	18.1		1	0.010	715597	9.8
	0.9	0.010	285178	18.3		0.9	0.010	708569	9.9
	0.8	0.010	278867	18.5		0.8	0.010	700258	10.1
	0.7	0.010	271404	18.7		0.7	0.010	690188	10.3
	0.6	0.010	263104	18.9		0.6	0.010	678729	10.5
	0.5	0.010	253530	19.2		0.5	0.010	664393	10.9
	0.4	0.010	242033	19.5		0.4	0.010	647417	11.1
	0.3	0.010	227746	19.9		0.3	0.010	625044	11.5
	0.2	0.010	208219	20.5		0.2	0.010	593778	12.2
	0.1	0.010	177642	21.8		0.1	0.010	539414	13.5

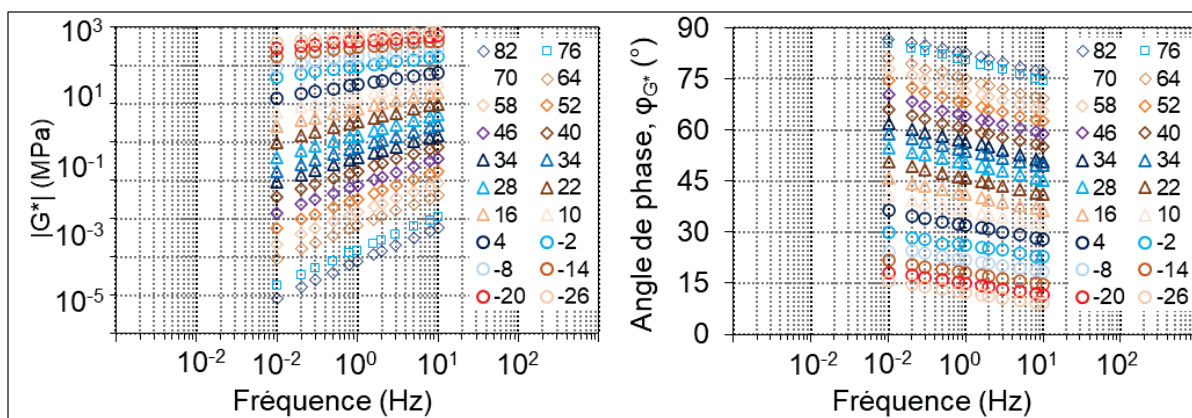


Figure A VII.28 Courbes isothermes RAP-8

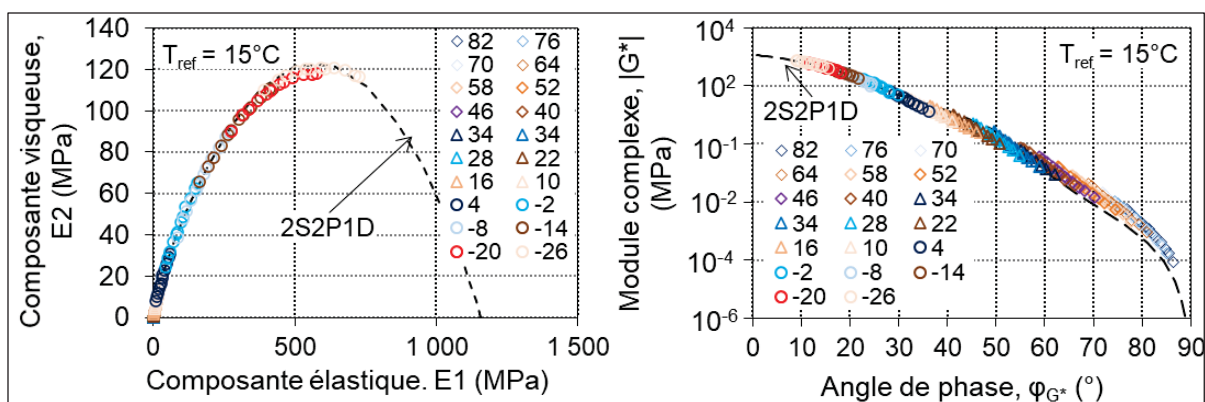


Figure A VII.29 Plans Cole-Cole et black RAP-8

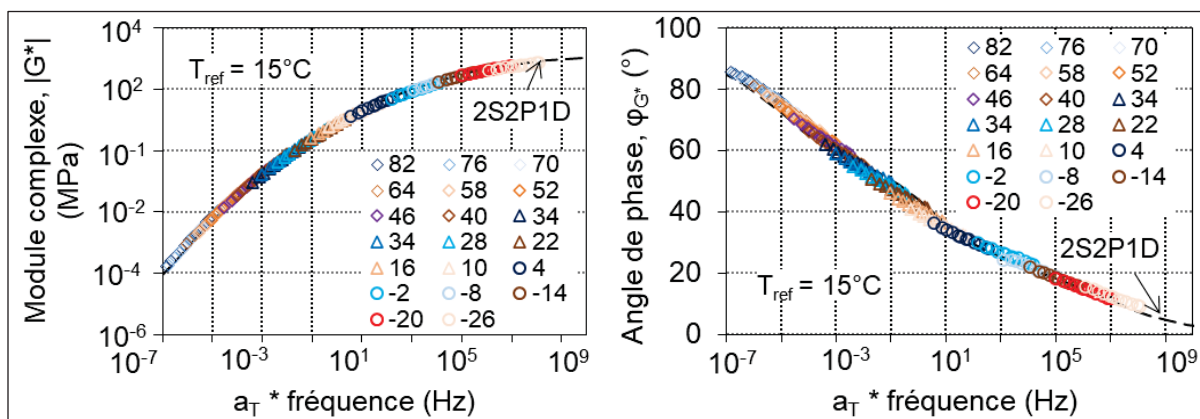


Figure A VII.30 Courbes maîtresses RAP-8

Tableau A VII.48 Paramètres 2S2P1D RAP-8

2S2P1D ($T_{ref} : 15^{\circ}\text{C}$)						
G00 (MPa): 0	G0 (MPa): 1158	k: 0.265	h: 0.630	δ : 8.900	β : 1133	C1: 21.1 C2: 158.5
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	82.0	76.0	70.0	64.0	58.0	
Tau	9.18E-11	2.08E-10	4.90E-10	1.22E-09	3.67E-09	
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	52.0	46.0	40.0	34.0	34.0	
Tau	1.10E-08	3.67E-08	1.22E-07	4.78E-07	1.22E-06	
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	28.0	15.0	16.0	10.0	4.0	
Tau	4.90E-06	1.22E-04	1.10E-04	6.12E-04	4.29E-03	
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	-2.0	-8.0	-14.0	-20.0	-26.0	
Tau	1.84E-01	1.47E+00	1.47E+01	1.22E+02	1.47E+03	

Tableau A VII. 50 Résultats densité maximale des GBR

Mix ID	Essai	Mesures					
		Échantillon dans l'air (g)	Récipient rempli d'eau + plaque (g)	Récipient + échantillon + plaque + eau (g)	Densité maximale, dmm	Température de l'eau (°C)	Densité maximale corrigée
RAP-1	1	1440.2	5194.0	6070.6	2.555	25.1	2.555
	2	1256.1	5207.7	5973.4	2.561	25.1	2.561
	Moyenne	1348.2	5200.9	6022.0	2.558	25.1	2.558
RAP-2	1	1486.8	5197.0	6100.7	2.550	25.0	2.550
	2	1601.8	5190.0	6167.7	2.567	25.0	2.567
	Moyenne	1544.3	5193.5	6134.2	2.558	25.0	2.558
RAP-3	1	1307.2	5207.7	5996.8	2.523	24.9	2.523
	2	1098.0	5194.0	5855.8	2.517	24.9	2.517
	Moyenne	1202.6	5200.9	5926.3	2.520	24.9	2.520
RAP-4	1	1056.2	5203.6	5848.5	2.568	25.0	2.568
	2	1234.4	5198.1	5952.1	2.570	25.0	2.570
	Moyenne	1145.3	5200.9	5900.3	2.569	25.0	2.569
RAP-5	1	1486.8	5194.0	6100.7	2.563	24.9	2.563
	2	1601.8	5190.0	6167.7	2.567	24.9	2.567
	Moyenne	1544.3	5192.0	6134.2	2.565	24.9	2.565
RAP-6	1	1588.7	5203.6	6180.2	2.595	24.9	2.596
	2	1552.6	5200.5	6154.3	2.593	24.9	2.593
	Moyenne	1570.7	5202.1	6167.3	2.594	24.9	2.594
RAP-7	1	2189.9	5210.0	6560.1	2.608	24.9	2.608
	2	1919.2	5207.7	6390.3	2.605	24.9	2.606
	Moyenne	2054.6	5208.9	6475.2	2.607	24.9	2.607
RAP-8	1	1895.8	5203.6	6361.2	2.568	25.0	2.568
	2	2190.8	5202.5	6541.6	2.572	25.0	2.572
	Moyenne	2043.3	5203.1	6451.4	2.570	25.0	2.570

Tableau A VII.51 Teneur en bitume et granulométries (noire et blanche)
des RAP-1 à RAP-4

Ignition									
ID		RAP-1.1	RAP-1.2	RAP-2.1	RAP-2.2	RAP-3.1	RAP-3.2	RAP-4.1	RAP-4.2
Masse panier		2839.3	2864.3	2864	2839.4	2838.8	2839.2	2863	2838.8
Masse panier + éc. Av.		4095.1	4304.2	4350	4441.9	3936.8	4146.8	4311.2	4049.9
Masse panier + éc. Ap.		4028.6	4226.7	4260.5	4348.2	3878.4	4073.6	4244.9	3994.432
% bitume non-corrigé		5.30%	5.38%	6.02%	5.85%	5.32%	5.60%	4.58%	4.58%
% bitume moyenne		5.34%		5.93%		5.46%		4.58%	
Granulométrie									
ID*		RAP-1 N	RAP-1 B	RAP-2 N	RAP-2 B	RAP-3 N	RAP-3 B	RAP-4 N	RAP-4 B
tamis (mm)	14	0	0	0	0	24.7	0	0	0
	10	57.4	25.7	105	17.3	124.3	18.3	70	16.5
	5	---	353.2	---	664.6	---	287.5	---	347.2
Masse passant 10 mm		1804.6	1248.2	3411	2350.2	1180	906.5	1379	926.7
Masse avant lavage		673.3	702.5	865.7	660.5	605.5	906.5	676.5	1386.4
Masse apres lavage		694.3	643.8	865.7	606.7	605.5	808.1	676.5	926.7
Tamis (mm)	5	214.2	1.6	286.1	1.3	202.8	3	226.9	2.9
	2.5	381.8	176.1	529.9	182	363.9	258.9	399.2	263.1
	1.25	516.4	296.8	715.2	299.7	499.5	448	530.5	445.6
	0.63	629.8	389	810.1	381.9	565.2	568.5	604.6	574.9
	0.315	675.8	484.6	844.5	457.5	587.9	659.4	641.4	702.1
	0.16	689.3	568.8	857.5	526.5	598.1	730.7	659.5	821.8
	0.08	692.9	621.6	861.9	576.3	602.4	785.7	666.5	891.3
	Plat	694.3	643.7	865.7	606.6	605.5	807.9	676.5	926.4

* N: courbe noire avant ignition ; B: courbe blanche après ignition

Tableau A VII. 52 Teneur en bitume et granulométries (noire et blanche)
des RAP-5 à RAP-8

Ignition									
ID		RAP-5.1	RAP-5.2	RAP-6.1	RAP-6.2	RAP-7.1	RAP-7.2	RAP-8.1	RAP-8.2
Masse panier		2863.1	2838.6	2863	2863.2	2867.3	2840.4	2863.4	2839
Masse panier + éc. Av.		4148.6	4165.3	4416.2	4165.1	5064.8	4755.2	5056	4735.1
Masse panier + éc. Ap.		4080.8	4096.1	4349.3	4106.8	4966.8	4671.8	4960.5	4652.1
% bitume non-corrigé		5.27%	5.22%	4.31%	4.48%	4.46%	4.36%	4.36%	4.38%
% bitume moyenne		5.25%		4.39%		4.41%		4.37%	
Granulométrie									
ID*		RAP-5 N	RAP-5 B	RAP-6 N	RAP-6 B	RAP-7 N	RAP-7 B	RAP-8 N	RAP-8 B
tamis (mm)	28	0	0	0	0	35	0	0	0
	20	0	0	0	0	221	34.9	397	85.5
	14	0	0	0	0	803	234.5	1273	496.3
	10	217	11.4	29.2	10.1	1645	660.4	2442	1160.6
	5	0	298.8	0	222.5	3582.1	2028.2	4196.9	2576.7
Masse passant 10 mm		2642	1093	1273.8	1479.9	3325	4493.4	3200	4485.8
Masse avant lavage		641.2	562.8	637.9	1247.3	839.7	722.6	812.8	687.4
Masse apres lavage		641.2	522.7	637.9	1135.8	839.7	645	812.8	625.2
Tamis (mm)	5	238.3	2.5	176.1	0	0	0	0	0
	2.5	399.4	145.6	346	431.5	385.1	195.8	263.1	159.6
	1.25	490.5	245.1	494.9	593.7	597.8	320.1	436.7	266
	0.63	550.4	314.3	572.8	726.5	694.4	403.8	575.7	351
	0.315	597.6	381.4	608.1	871.2	747.7	487	697.8	445.4
	0.16	625.8	446.1	625.8	1007.6	779.5	569.3	766.6	537.1
	0.08	636.9	491.8	633.2	1100.3	798.6	623.2	790.2	601.6
	Plat	641.2	522.7	637.9	1135.8	839.7	722.6	806.7	687.1
* N: courbe noire avant ignition ; B: courbe blanche après ignition									

* N: courbe noire avant ignition ; B: courbe blanche après ignition

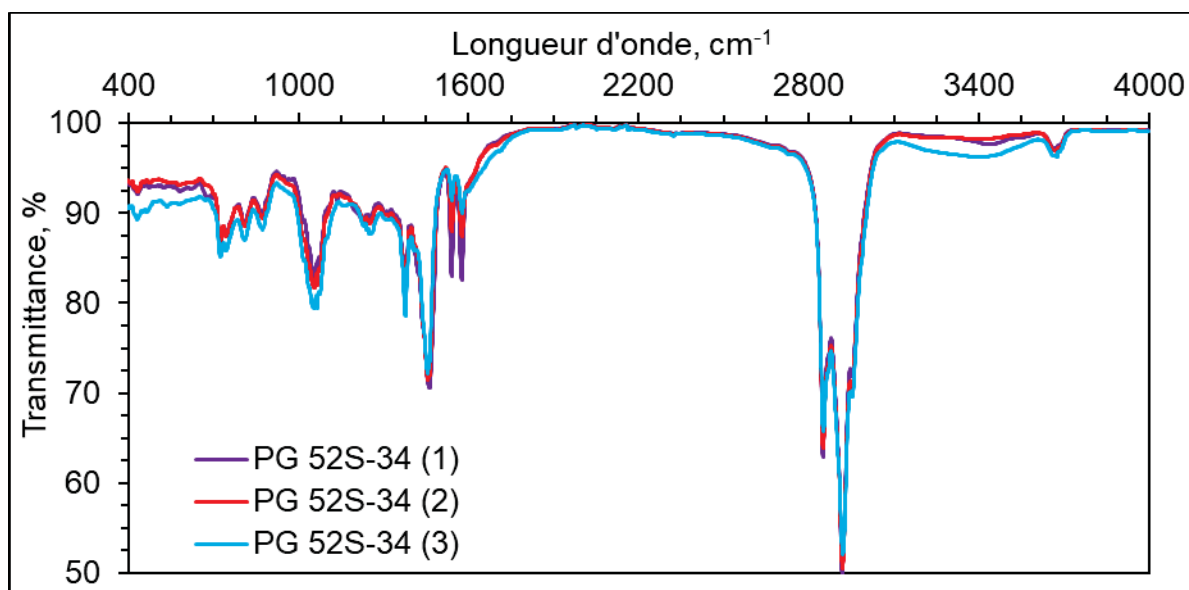


Figure A VII.31 Résultats FTIR PG 52S-34

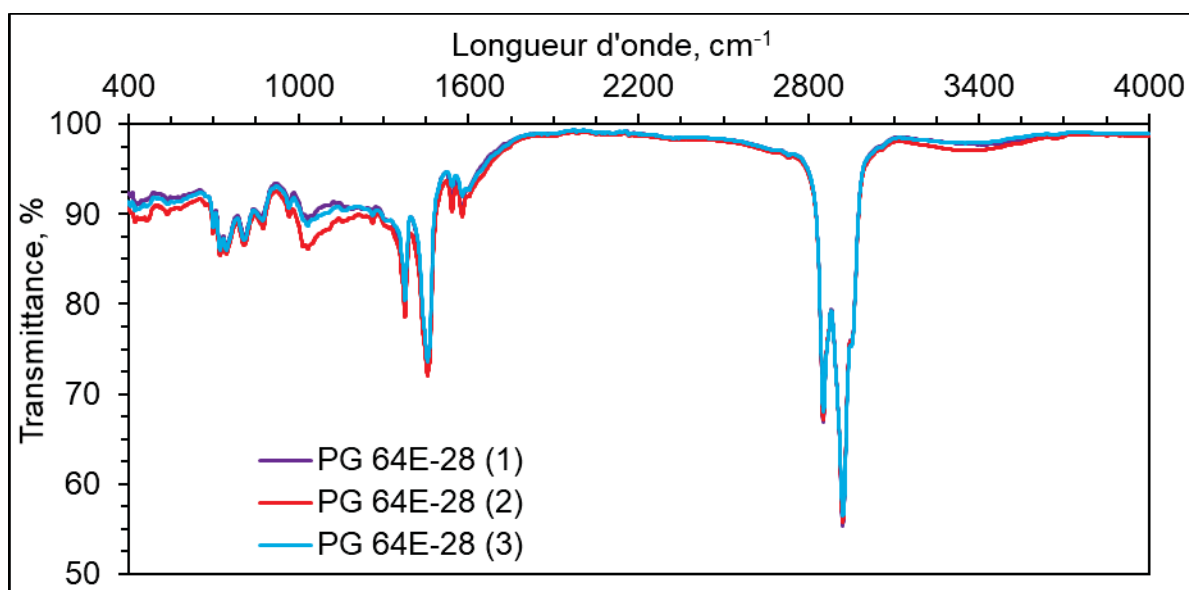


Figure A VII.32 Résultats FTIR PG 64E-28

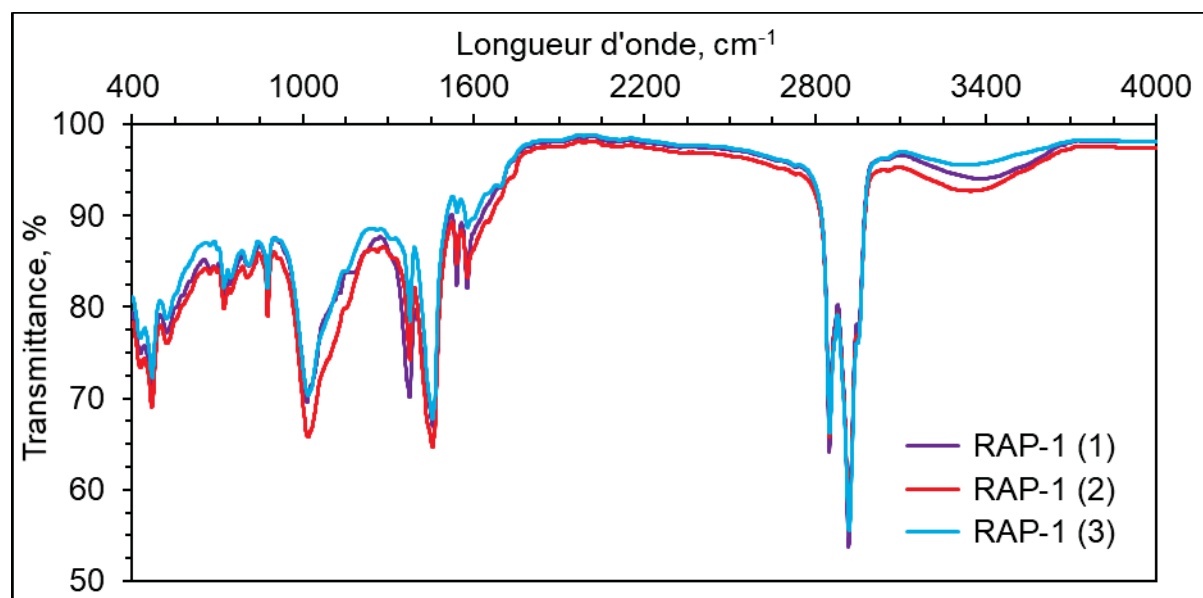


Figure A VII.33 Résultats FTIR RAP-1

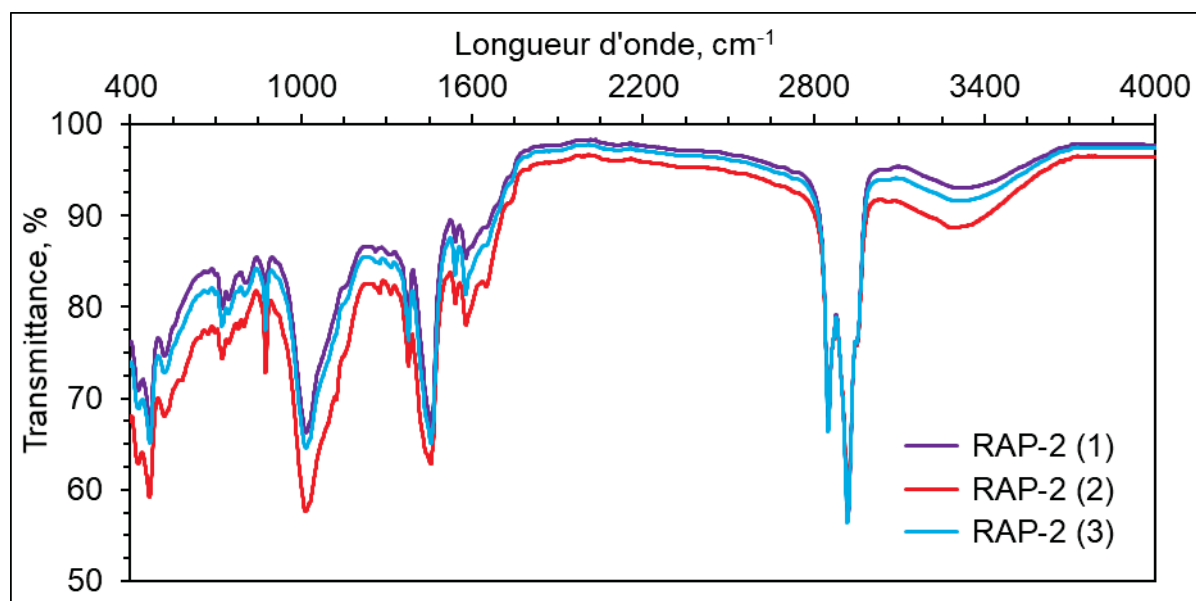


Figure A VII.34 Résultats FTIR RAP-2

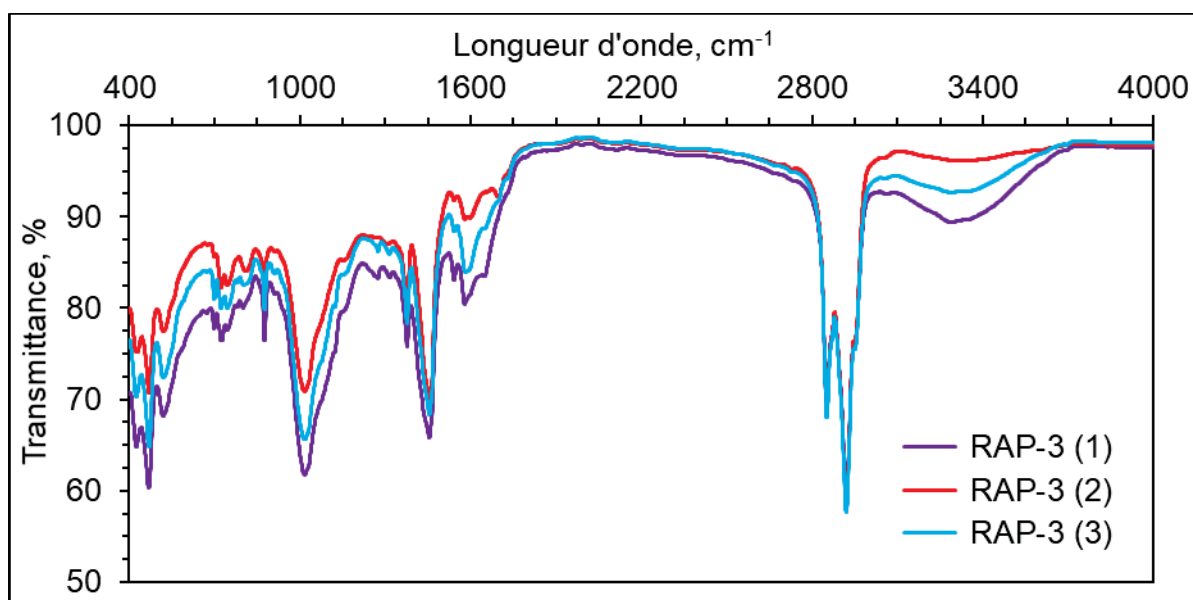


Figure A VII.35 Résultats FTIR RAP-3

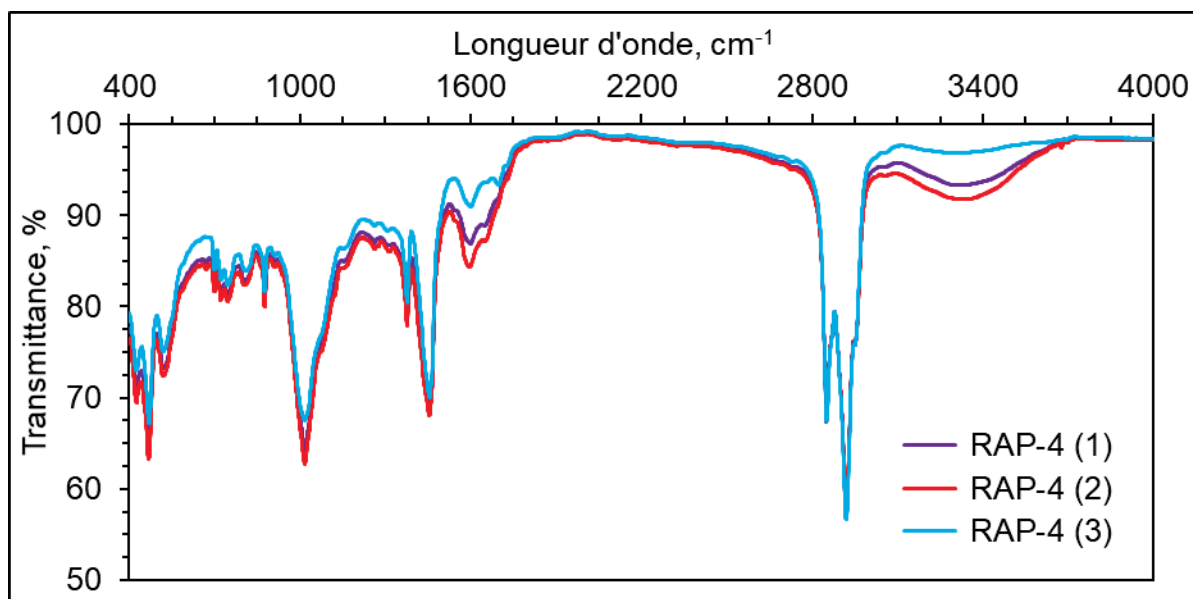


Figure A VII.36 Résultats FTIR RAP-4

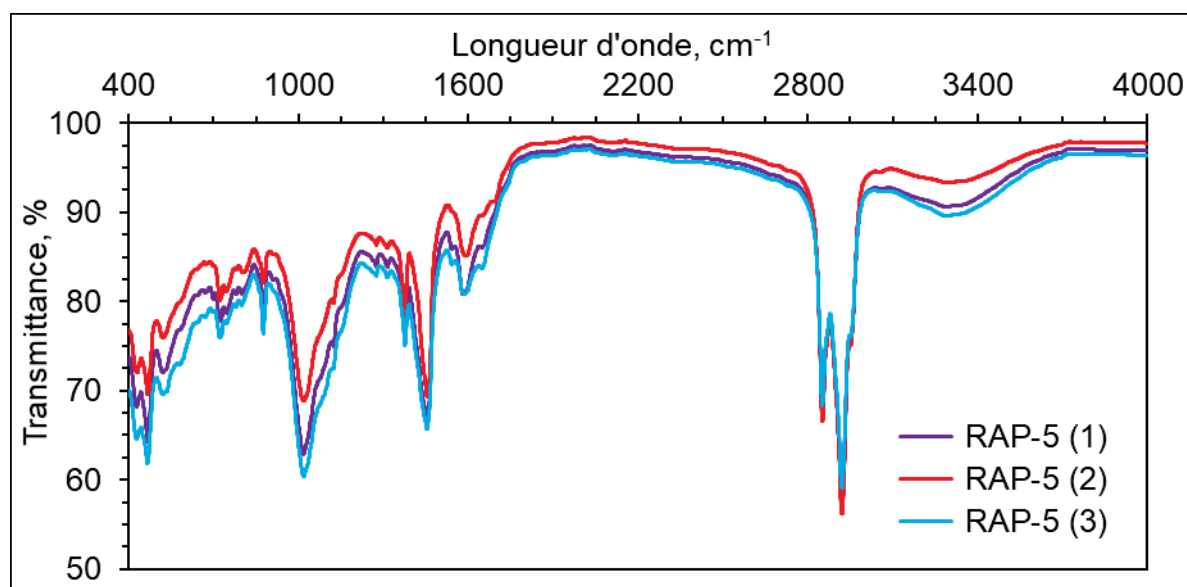


Figure A VII.37 Résultats FTIR RAP-5

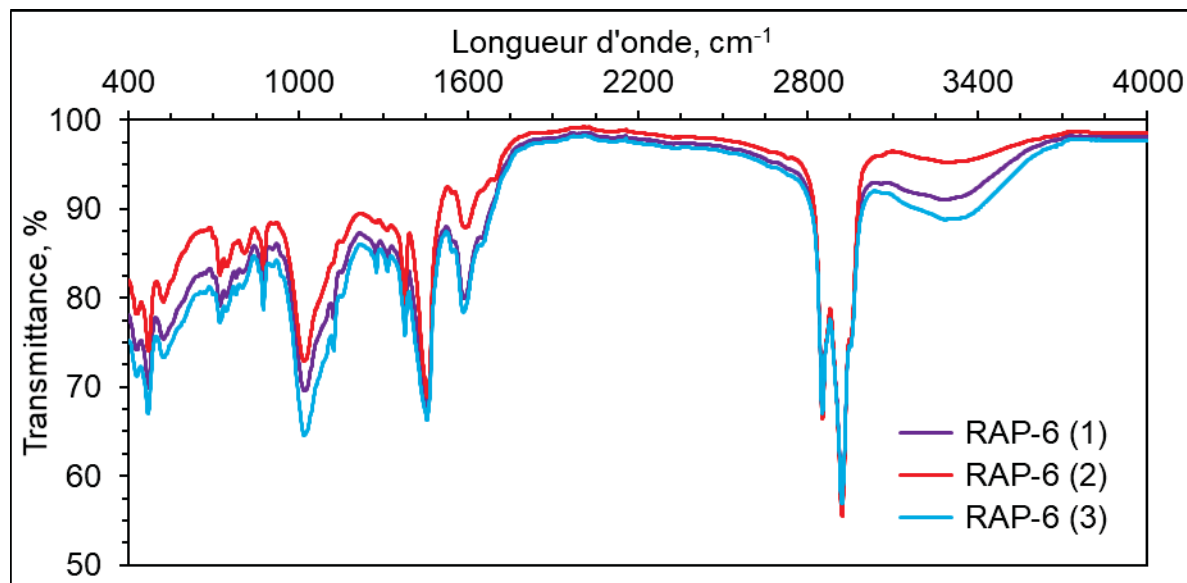


Figure A VII.38 Résultats FTIR RAP-6

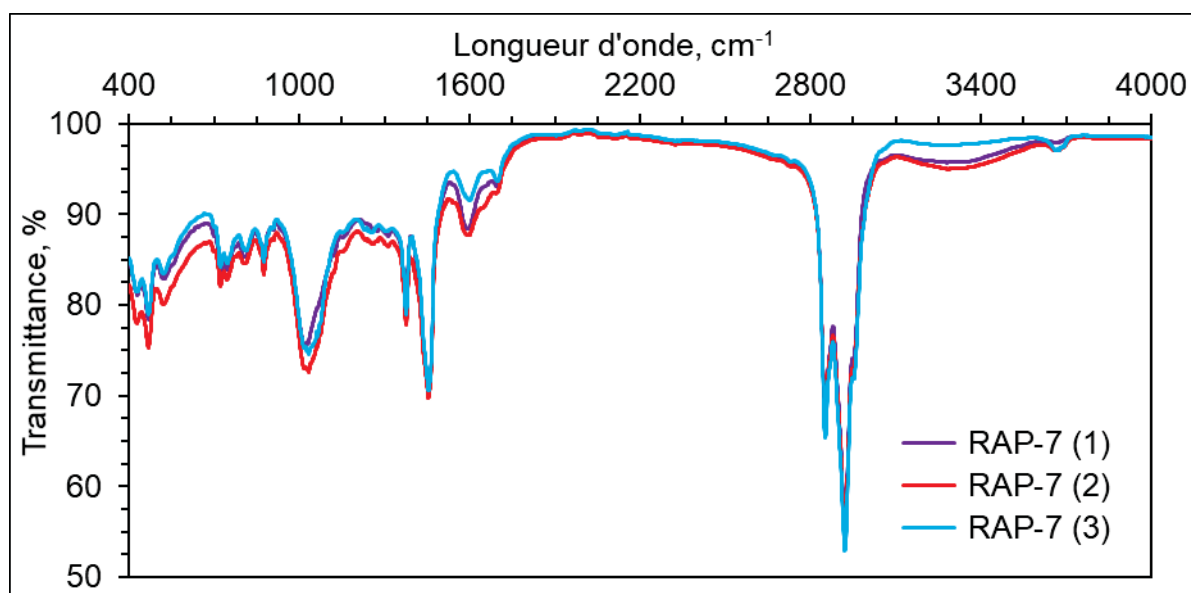


Figure A VII.39 Résultats FTIR RAP-7

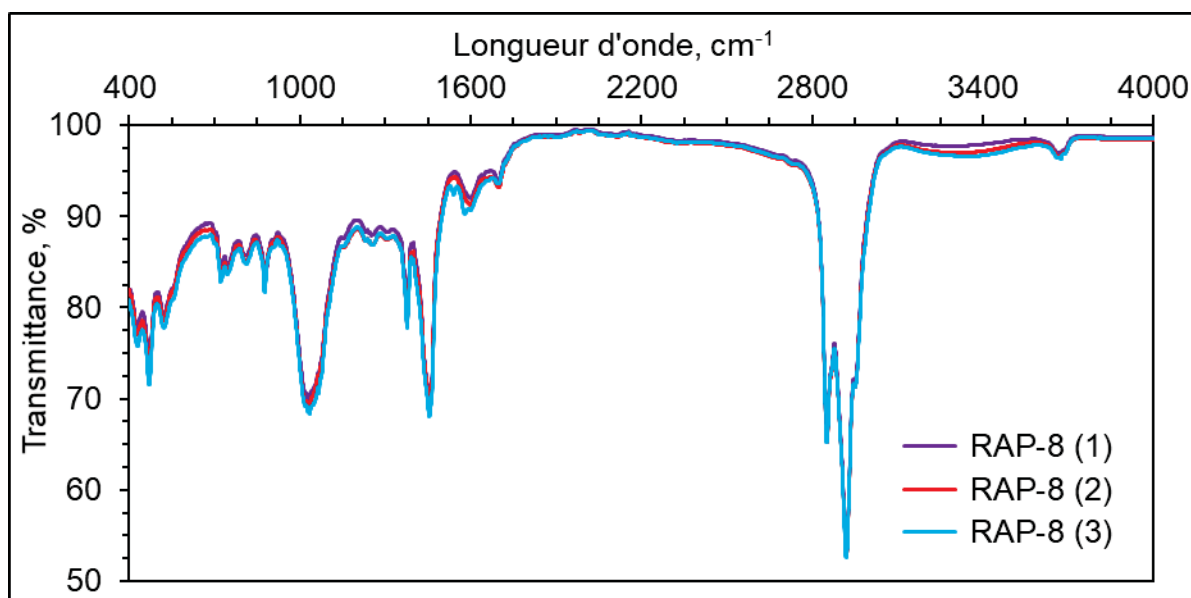


Figure A VII.40 Résultats FTIR RAP-8

Tableau A VII.53 Résultats ignition et granulométrie des enrobés TR

Ignition									
ID	TR-1.1	TR-1.2	TR-2.1	TR-2.2	TR-3.1	TR-3.2	TR4.1	TR4.2	
Masse panier	2842.1	2856.6	2857.2	2843.3	2857.5	2842.2	2843.2	2857.7	
Masse panier + éc. Av.	4012.8	3955.8	4059.4	4081.2	4088.8	4132.8	3913.2	3991.7	
Masse panier + éc. Ap.	3950.0	3896.7	3994.3	4013.2	4022.2	4062.9	3855.3	3930.1	
% bitume non-corrigé	5.36%	5.38%	5.42%	5.49%	5.41%	5.42%	5.41%	5.43%	
% bitume moyenne	5.37%		5.45%		5.41%		5.42%		
Granulométrie									
Masse avant lavage	1105.5	1037.9	1134.3	1167.8	1162.6	1218.1	1009.1	1067.7	
Masse apres lavage	1054.5	988.3	1074.4	1106.6	1103.3	1156	955.4	1013	
Tamis (mm)	10	20.6	40.9	28.4	40.4	50.8	44.7	36.6	35.8
	5	464.8	448.4	502.6	515.3	502.3	521	437.1	459.8
	2.5	772.8	725.8	797.5	823.4	816.9	852.7	713.7	754.2
	1.25	867.8	817.1	893.1	920	917	958.3	798	842.5
	0.63	919.2	864.5	943	971.5	967.8	1011.5	841.4	888.6
	0.315	966.8	908.2	990.5	1020.8	1016.3	1062.3	882.3	932.3
	0.16	1008.3	946.8	1031.1	1062.7	1057.7	1105.1	917.3	969.6
	0.08	1038.4	974.7	1061.4	1093.9	1088.2	1137.1	943.9	998
	Plat	1054.5	988.3	1074.4	1106.6	1102.5	1155.5	955.4	1013
* Les masses pour la granulométrie sont cumulées									

Tableau A VII.54 Résultats ignition et granulométrie des enrobés HB

Ignition								
ID	HB-1.1	HB-1.2	HB-2.1	HB-2.2	HB-3.1	HB-3.2	HB4.1	HB4.2
Masse panier	2860.2	2844.6	2860.3	2845.5	2862	2846.9	2862.2	2847.3
Masse panier + éc. Av.	4084.7	4045.2	4181.9	4108.9	4130.9	4078	3968.7	3890.3
Masse panier + éc. Ap.	4017.6	3979	4110.3	4039.8	4059.1	4007.7	3905.8	3832.3
% bitume non-corrigé	5.48%	5.51%	5.42%	5.47%	5.66%	5.71%	5.68%	5.56%
% bitume moyenne	5.50%		5.44%		5.68%		5.62%	
Granulométrie								
Masse avant lavage	984.4	991.3	948.4	1192.2	1021.9	1129.4	979.4	943.9
Masse apres lavage	938.5	945.4	890.4	1118	960	1057.8	915.2	883.8
Tamis (mm)	10	53.6	31.2	38.8	40.3	50.7	33.1	25.6
	5	468	454.3	415.9	516.8	438.5	470.3	401.6
	2.5	715.4	717	663.6	825.6	702.1	774	668
	1.25	795.3	798.7	743.6	927	790.8	872	750
	0.63	835	839.6	784.8	980.2	838.4	925.3	801.5
	0.315	872.5	877.7	822.8	1030	882	973.6	842.4
	0.16	904.6	910.2	857.3	1074.8	921.2	1017	879.7
	0.08	928.7	934.9	883.3	1108.3	949.7	1048.5	907.9
	Plat	938.5	945.4	890.4	1117.8	960	1057.7	915.1

* Les masses pour la granulométrie sont cumulées

Tableau A VII.56 Densité brute des éprouvettes Marshall (40 coups chaque côté) enrobés TR

Échantillon	g		Masse dans l'eau	g	Dmb non- corrigée	°C		Dmb corrigée à 25oC	Dmm	Vides hydro
	Masse sèche	Masse SSS dans l'air				Température eau				
TR-1.1	1259.3	730.9	1264.3	2.361	2.361	25.0		2.361	2.524	6.5%
TR-1.2	1260.9	730.8	1264.0	2.365	2.365	24.6		2.365	2.524	6.3%
TR-1.3	1253.6	730.3	1257.9	2.376	2.376	24.6		2.376	2.524	5.9%
TR-1.4	1257.7	732.7	1261.2	2.380	2.380	24.4		2.380	2.524	5.7%
TR-1.5	1263.5	739.2	1266.4	2.397	2.397	24.4		2.397	2.524	5.0%
TR-1.6	1259.8	734.0	1263.9	2.377	2.377	25.8		2.377	2.524	5.8%
TR-2.1	1210.7	703.3	1213.9	2.371	2.371	25.8		2.371	2.500	5.2%
TR-2.2	1155.2	678.3	1157.4	2.411	2.411	25.8		2.411	2.500	3.6%
TR-2.3	1204.4	708.7	1206.0	2.422	2.422	25.8		2.421	2.500	3.1%
TR-2.4	1226.5	715.5	1229.0	2.389	2.389	25.7		2.388	2.500	4.5%
TR-2.5	1240.2	726.7	1243.0	2.402	2.402	25.7		2.402	2.500	3.9%
TR-2.6	1226.4	720.2	1229.1	2.410	2.410	25.7		2.409	2.500	3.6%
TR-3.1	1184.1	696.7	1187.0	2.415	2.415	24.7		2.415	2.519	4.1%
TR-3.2	1123.2	663.0	1125.1	2.431	2.431	24.7		2.431	2.519	3.5%
TR-3.3	1253.3	739.0	1256.0	2.424	2.424	24.7		2.424	2.519	3.8%
TR-3.4	1244.2	732.6	1246.5	2.421	2.421	24.7		2.421	2.519	3.9%
TR-3.5	1237.5	727.2	1240.0	2.413	2.413	24.7		2.413	2.519	4.2%
TR-3.6	1214.5	716.9	1216.7	2.430	2.430	24.6		2.430	2.519	3.5%
TR-4.1	1196.2	706.7	1198.9	2.430	2.430	24.3		2.431	2.522	3.6%
TR-4.2	1242.3	733.2	1245.7	2.424	2.424	24.2		2.424	2.522	3.9%
TR-4.3	1218.0	718.3	1220.9	2.423	2.423	24.2		2.424	2.522	3.9%
TR-4.4	1222.4	716.5	1225.4	2.402	2.402	24.2		2.403	2.522	4.7%
TR-4.5	1237.6	726.2	1240.2	2.408	2.408	24.2		2.408	2.522	4.5%
TR-4.6	1230.7	725.1	1233.8	2.419	2.419	24.2		2.420	2.522	4.1%

Tableau A VII.57 Densité brute des éprouvettes Marshall (40 coups chaque côté) enrobés HB

Échantillon	g		g	Masse dans l'eau	g	Masse SSS dans l'air	Dmb non- corrigée	°C Température eau	Dmb corrigée à 25oC	Dmm	Vides hydro
	Masse sèche										
HB-1.1	1183.4		700.5		1184.9	2.443		25.6	2.443	2.526	3.3%
HB-1.2	1196.5		709.1		1198.1	2.447		25.6	2.446	2.526	3.1%
HB-1.3	1199.6		713.0		1201.7	2.455		25.6	2.454	2.526	2.8%
HB-1.4	1236.9		734.5		1238.4	2.455		25.6	2.454	2.526	2.8%
HB-1.5	1180.4		690.0		1183.2	2.393		25.6	2.393	2.526	5.3%
HB-1.6	1179.9		695.7		1182.2	2.425		25.4	2.425	2.526	4.0%
HB-2.1	1178.4		698.7		1180.5	2.446		25.3	2.446	2.509	2.5%
HB-2.2	1179.9		700.2		1182.0	2.449		25.2	2.449	2.509	2.4%
HB-2.3	1253.4		742.3		1255.1	2.444		25.2	2.444	2.509	2.6%
HB-2.4	1252.6		741.8		1255.5	2.438		25.2	2.438	2.509	2.8%
HB-2.5	1198.9		710.0		1201.1	2.441		25.2	2.441	2.509	2.7%
HB-2.6	1195.5		711.3		1197.4	2.459		25.1	2.459	2.509	2.0%
HB-3.1	1181.8		704.0		1183.4	2.465		25.1	2.465	2.518	2.1%
HB-3.2	1182.0		703.9		1183.8	2.463		25.1	2.463	2.518	2.2%
HB-3.3	1210.0		721.1		1211.9	2.465		25.0	2.465	2.518	2.1%
HB-3.4	1216.0		724.8		1217.8	2.467		24.9	2.467	2.518	2.0%
HB-3.5	1165.0		694.9		1166.7	2.469		24.9	2.469	2.518	1.9%
HB-3.6	1174.4		699.8		1176.2	2.465		24.8	2.465	2.518	2.1%
HB-4.1	1130.5		677.2		1131.9	2.486		24.8	2.486	2.514	1.1%
HB-4.2	1176.0		703.3		1177.2	2.482		25.2	2.481	2.514	1.3%
HB-4.3	1217.5		727.4		1219.1	2.476		25.2	2.476	2.514	1.5%
HB-4.4	1209.2		723.3		1210.4	2.482		25.2	2.482	2.514	1.3%
HB-4.5	1220.5		729.3		1222.0	2.477		25.2	2.477	2.514	1.5%
HB-4.6	1198.2		715.5		1199.9	2.474		25.2	2.473	2.514	1.6%

Tableau A VII.58 Densité brute des éprouvettes Marshall (40 coups chaque côté) enrobés PM

Échantillon	g	g	g	Dmb non-corrigée	°C		Dmb corrigée à 25oC	Dmm	Vides hydro
	Masse sèche	Masse dans l'eau	Masse SSS dans l'air		Température eau				
PM-1.1	1188.2	691.1	1193.5	2.365	24.7	2.365	2.530	6.5%	
PM-1.2	1196.9	700.2	1201.0	2.390	24.7	2.390	2.530	5.5%	
PM-1.3	1168.1	684.1	1171.9	2.395	24.6	2.395	2.530	5.3%	
PM-1.4	1210.4	706.3	1214.6	2.381	24.6	2.382	2.530	5.9%	
PM-1.5	1206.5	706.2	1210.9	2.391	24.6	2.391	2.530	5.5%	
PM-1.6	1195.7	700.9	1199.9	2.396	24.6	2.396	2.530	5.3%	
PM-2.1	1180.9	697.7	1182.5	2.436	24.9	2.436	2.525	3.5%	
PM-2.2	1205.3	712.8	1206.8	2.440	24.9	2.440	2.525	3.4%	
PM-2.3	1206.7	706.0	1209.3	2.398	24.9	2.398	2.525	5.0%	
PM-2.4	1191.2	699.0	1193.1	2.411	24.8	2.411	2.525	4.5%	
PM-2.5	1223.4	718.9	1225.6	2.414	24.8	2.415	2.525	4.4%	
PM-2.6	1238.2	723.6	1240.5	2.395	24.7	2.396	2.525	5.1%	
PM-3.1	1236.3	734.5	1238.4	2.453	24.5	2.454	2.521	2.7%	
PM-3.2	1239.1	736.3	1241.0	2.455	24.4	2.455	2.521	2.6%	
PM-3.3	1256.3	747.2	1258.2	2.459	24.4	2.459	2.521	2.5%	
PM-3.4	1238.2	733.3	1240.8	2.440	24.4	2.440	2.521	3.2%	
PM-3.5	1210.2	715.2	1212.7	2.433	24.4	2.433	2.521	3.5%	
PM-3.6	1209.7	719.5	1211.9	2.457	24.3	2.457	2.521	2.5%	
PM-4.1	1193.5	703.7	1194.5	2.432	25.0	2.432	2.515	3.3%	
PM-4.2	1206.3	709.2	1208.0	2.418	25.2	2.418	2.515	3.8%	
PM-4.3	1201.2	708.3	1203.0	2.428	25.2	2.428	2.515	3.5%	
PM-4.4	1206.6	710.7	1208.9	2.422	25.2	2.422	2.515	3.7%	
PM-4.5	1208.2	714.3	1209.5	2.440	25.1	2.440	2.515	3.0%	
PM-4.6	1204.7	713.2	1206.5	2.442	25.1	2.442	2.515	2.9%	

Tableau A VII.59 Résultats bruts densités maximales (dmm) volet 2

Mix ID	Essai	Mesures					
		Échantillon dans l'air (g)	Récipient rempli d'eau + plaque (g)	Récipient + échantillon + plaque + eau (g)	Densité maximale, dmm	Température de l'eau (°C)	Densité maximale corrigée
ESG-10 R30 (TR-1)	1	1206.4	5173.6	5902.1	2.524	25.0	2.524
	2	1104.8	5202.5	5869.6	2.524	25.0	2.524
	Moyenne	1155.6	5188.1	5885.9	2.524	25.0	2.524
ESG-10 R30 (TR-2)	1	1336.3	5169.5	5974.5	2.515	25.1	2.515
	2	1178.0	5203.2	5912.6	2.514	25.1	2.514
	Moyenne	1257.2	5186.4	5943.6	2.515	25.1	2.514
ESG-10 R30 (TR-3)	1	1298.2	5203.2	5985.4	2.516	24.9	2.516
	2	1204.7	5173.6	5900.6	2.522	24.9	2.522
	Moyenne	1251.5	5188.4	5943.0	2.519	24.9	2.519
ESG-10 R30 (TR-4)	1	1269.6	5202.5	5968.5	2.521	25.0	2.521
	2	1274.7	5169.5	5939.1	2.524	25.0	2.524
	Moyenne	1272.2	5186.0	5953.8	2.522	25.0	2.522
ESG-10 R30 (HB-1)	1	1223.7	5187.4	5927	2.528	25.1	2.528
	2	1212.4	5195.9	5927.9	2.524	25.1	2.524
	Moyenne	1218.1	5191.7	5927.5	2.526	25.1	2.526
ESG-10 R30 (HB-2)	1	1228.4	5193.6	5933.2	2.513	25.0	2.513
	2	1353.6	5189.6	6003.6	2.509	25.0	2.509
	Moyenne	1291.0	5191.6	5968.4	2.511	25.0	2.511
ESG-10 R30 (HB-3)	1	1197.3	5193.6	5916	2.521	25.2	2.521
	2	1260.9	5189.6	5949.3	2.516	25.2	2.516
	Moyenne	1229.1	5191.6	5932.7	2.518	25.2	2.518
ESG-10 R30 (HB-4)	1	1041.3	5187.4	5814.1	2.512	24.9	2.512
	2	1204.2	5195.9	5921.7	2.517	24.9	2.517
	Moyenne	1122.8	5191.7	5867.9	2.514	24.9	2.514
ESG-10 R30 (PM-1)	1	1128.2	5193.6	5875.5	2.528	25.0	2.528
	2	1071.7	5200.1	5848.7	2.533	25.0	2.533
	Moyenne	1100.0	5196.9	5862.1	2.530	25.0	2.530
ESG-10 R30 (PM-2)	1	1134.3	5169.5	5854.8	2.526	25.1	2.526
	2	1017.9	5191	5805.7	2.525	25.1	2.524
	Moyenne	1076.1	5180.3	5830.3	2.525	25.1	2.525
ESG-10 R30 (PM-3)	1	1299.4	5193.6	5977.2	2.519	24.9	2.519
	2	1345.7	5200.1	6012.2	2.522	24.9	2.522
	Moyenne	1322.6	5196.9	5994.7	2.521	24.9	2.521
ESG-10 R30 (PM-4)	1	1221.6	5169.5	5905	2.513	25.1	2.513
	2	1186.5	5191	5906.2	2.518	25.1	2.517
	Moyenne	1204.1	5180.3	5905.6	2.515	25.1	2.515

Tableau A VII.60 Mesures des éprouvettes Marshall (40 coups chaque côté) enrobés TR

Échantillon	mm							g		cm ³ volume	Dmb	Dmm	% Vides	Rapport L/D
	h1	h2	h3	d1	d2	d3	h _{moy}	d _{moy}	Masse seche					
TR-1.1	67.92	68.45	68.06	101.81	101.50	101.52	68.14	101.61	1259.4	552.6	2.279	2.524	9.7%	0.67
TR-1.2	67.93	67.63	68.16	101.68	101.42	101.48	67.91	101.53	1260.9	549.7	2.294	2.524	9.1%	0.67
TR-1.3	67.16	67.32	67.13	101.99	102.01	102.08	67.20	102.03	1253.6	549.4	2.282	2.524	9.6%	0.66
TR-1.4	67.17	67.10	67.43	101.43	101.38	101.92	67.23	101.58	1257.6	544.8	2.308	2.524	8.5%	0.66
TR-1.5	67.07	66.97	67.14	101.53	101.78	101.54	67.06	101.62	1263.5	543.9	2.323	2.524	8.0%	0.66
TR-1.6	66.77	67.50	67.46	101.78	101.63	101.67	67.24	101.69	1259.8	546.2	2.307	2.524	8.6%	0.66
TR-2.1	65.61	65.35	64.82	101.68	101.75	101.83	65.26	101.75	1210.7	530.7	2.281	2.500	8.7%	0.64
TR-2.2	60.73	60.46	61.28	101.96	101.80	101.76	60.82	101.84	1155.2	495.4	2.332	2.500	6.7%	0.60
TR-2.3	63.12	63.36	62.71	101.72	101.78	101.61	63.06	101.70	1204.4	512.3	2.351	2.500	6.0%	0.62
TR-2.4	64.80	65.26	65.53	101.91	101.46	101.46	65.20	101.61	1226.3	528.7	2.320	2.500	7.2%	0.64
TR-2.5	65.15	65.76	65.63	101.62	101.46	101.77	65.51	101.62	1240.2	531.3	2.334	2.500	6.6%	0.64
TR-2.6	64.67	64.47	65.10	101.52	101.63	101.47	64.75	101.54	1226.3	524.3	2.339	2.500	6.4%	0.64
TR-3.1	62.02	61.98	62.12	101.52	101.42	101.61	62.04	101.52	1184.1	502.2	2.358	2.519	6.4%	0.61
TR-3.2	58.15	58.67	59.17	101.23	101.28	101.17	58.66	101.23	1123.3	472.1	2.379	2.519	5.5%	0.58
TR-3.3	64.71	65.54	65.38	101.63	101.70	101.60	65.21	101.64	1253.3	529.1	2.369	2.519	6.0%	0.64
TR-3.4	64.69	64.97	64.81	101.37	101.51	101.36	64.82	101.41	1244.4	523.6	2.377	2.519	5.7%	0.64
TR-3.5	64.48	64.49	64.60	101.45	101.28	101.32	64.52	101.35	1237.7	520.5	2.378	2.519	5.6%	0.64
TR-3.6	63.64	63.45	63.35	101.46	101.32	101.49	63.48	101.42	1214.5	512.9	2.368	2.519	6.0%	0.63
TR-4.1	62.58	61.89	62.45	101.57	101.73	101.59	62.31	101.63	1196.3	505.4	2.367	2.522	6.2%	0.61
TR-4.2	64.68	64.57	64.99	101.66	101.71	101.50	64.75	101.62	1242.3	525.2	2.366	2.522	6.2%	0.64
TR-4.3	64.11	64.54	64.31	101.38	101.44	101.51	64.32	101.44	1218.0	519.9	2.343	2.522	7.1%	0.63
TR-4.4	64.37	64.29	64.31	101.37	101.51	101.55	64.32	101.48	1222.6	520.2	2.350	2.522	6.8%	0.63
TR-4.5	64.81	65.14	65.44	101.37	101.64	101.41	65.13	101.47	1237.5	526.7	2.349	2.522	6.8%	0.64
TR-4.6	64.42	63.84	64.66	101.41	101.27	101.31	64.31	101.33	1230.6	518.6	2.373	2.522	5.9%	0.63

Tableau A VII.61 Mesures des éprouvettes Marshall (40 coups chaque côté) enrobés HB

Échantillon	mm							g		cm ³ volume	Dmb	Dmm	% Vides	Rapport L/D
	h1	h2	h3	d1	d2	d3	h _{moy}	d _{moy}	Masse seche					
HB-1.1	61.73	61.33	61.79	101.66	101.61	101.74	61.62	101.67	1183.0	500.2	2.365	2.526	6.4%	0.61
HB-1.2	61.76	61.91	62.19	101.48	101.38	101.27	61.95	101.38	1196.6	500.1	2.393	2.526	5.3%	0.61
HB-1.3	61.63	61.90	61.86	101.51	101.71	101.55	61.80	101.59	1199.7	500.9	2.395	2.526	5.2%	0.61
HB-1.4	63.18	63.72	63.68	101.63	101.72	101.53	63.53	101.63	1236.9	515.3	2.400	2.526	5.0%	0.63
HB-1.5	62.77	63.24	62.97	101.19	101.22	101.11	62.99	101.17	1180.4	506.4	2.331	2.526	7.7%	0.62
HB-1.6	61.23	61.49	61.60	101.52	101.90	101.69	61.44	101.70	1179.9	499.1	2.364	2.526	6.4%	0.60
HB-2.1	61.22	61.19	61.57	101.17	101.31	101.22	61.33	101.23	1178.5	493.6	2.387	2.509	4.8%	0.61
HB-2.2	61.25	60.85	60.83	101.46	101.72	101.55	60.98	101.58	1180.0	494.1	2.388	2.509	4.8%	0.60
HB-2.3	64.80	64.60	64.71	101.86	101.86	101.48	64.70	101.73	1253.4	525.9	2.383	2.509	5.0%	0.64
HB-2.4	65.65	65.00	64.82	100.86	101.26	101.37	65.16	101.16	1252.6	523.7	2.392	2.509	4.7%	0.64
HB-2.5	62.37	62.14	61.86	101.71	101.65	101.39	62.12	101.58	1199.1	503.5	2.382	2.509	5.1%	0.61
HB-2.6	61.47	61.83	61.11	101.56	101.68	101.56	61.47	101.60	1195.6	498.4	2.399	2.509	4.4%	0.61
HB-3.1	60.36	60.75	60.55	101.63	101.60	101.53	60.55	101.59	1181.9	490.8	2.408	2.518	4.4%	0.60
HB-3.2	61.05	60.29	60.55	101.65	101.82	101.65	60.63	101.71	1182.0	492.6	2.400	2.518	4.7%	0.60
HB-3.3	62.39	62.00	61.64	101.56	101.29	101.48	62.01	101.44	1210.0	501.2	2.414	2.518	4.1%	0.61
HB-3.4	61.91	61.77	62.20	101.30	101.54	101.81	61.96	101.55	1216.1	501.8	2.423	2.518	3.8%	0.61
HB-3.5	59.32	59.85	60.15	101.65	101.58	101.78	59.77	101.67	1165.1	485.3	2.401	2.518	4.6%	0.59
HB-3.6	60.64	60.68	60.01	101.29	101.60	101.59	60.44	101.49	1174.5	489.0	2.402	2.518	4.6%	0.60
HB-4.1	57.60	57.16	57.90	101.27	101.67	101.65	57.55	101.53	1130.6	466.0	2.426	2.514	3.5%	0.57
HB-4.2	60.00	59.77	60.19	101.42	101.56	101.46	59.99	101.48	1176.1	485.2	2.424	2.514	3.6%	0.59
HB-4.3	62.05	61.99	62.21	101.44	101.37	101.85	62.08	101.55	1217.6	502.9	2.421	2.514	3.7%	0.61
HB-4.4	61.05	61.62	61.09	101.36	101.64	101.34	61.25	101.45	1209.2	495.1	2.442	2.514	2.9%	0.60
HB-4.5	62.11	62.15	61.94	101.18	101.44	101.41	62.07	101.34	1220.8	500.7	2.438	2.514	3.0%	0.61
HB-4.6	60.99	61.20	61.48	101.31	101.81	101.34	61.22	101.49	1198.5	495.3	2.420	2.514	3.7%	0.60

Tableau A VII.62 Mesures des éprouvettes Marshall (40 coups chaque côté) enrobés PM

Échantillon	mm								g Masse seche	cm ³ volume	Dmb	Dmm	% Vides	Rapport L/D
	h1	h2	h3	d1	d2	d3	h _{moy}	d _{moy}						
PM-1.1	64.06	63.63	64.09	101.63	101.42	101.61	63.93	101.55	1188.5	517.8	2.295	2.530	9.3%	0.63
PM-1.2	63.18	63.11	63.6	101.47	101.67	101.81	63.30	101.65	1196.9	513.7	2.330	2.530	7.9%	0.62
PM-1.3	61.74	61.89	62.26	101.58	101.64	101.38	61.96	101.53	1168.2	501.7	2.328	2.530	8.0%	0.61
PM-1.4	64.7	63.84	64.76	101.61	101.74	101.8	64.43	101.72	1210.6	523.6	2.312	2.530	8.6%	0.63
PM-1.5	64.04	64.53	64.19	101.37	101.51	101.37	64.25	101.42	1206.6	519.0	2.325	2.530	8.1%	0.63
PM-1.6	63.43	63.98	63.27	101.56	101.46	101.67	63.56	101.56	1195.7	514.9	2.322	2.530	8.2%	0.63
PM-2.1	61.42	61.25	61.1	101.56	101.63	101.71	61.26	101.63	1181.0	497.0	2.376	2.525	5.9%	0.60
PM-2.2	62.83	62.86	62.06	101.63	101.46	101.56	62.58	101.55	1205.3	506.9	2.378	2.525	5.8%	0.62
PM-2.3	63.82	63.18	63.74	101.63	101.86	101.65	63.58	101.71	1206.7	516.6	2.336	2.525	7.5%	0.63
PM-2.4	62.74	63.42	62.52	101.59	101.56	101.48	62.89	101.54	1191.3	509.3	2.339	2.525	7.4%	0.62
PM-2.5	64.17	64.19	64.02	101.56	101.61	101.72	64.13	101.63	1223.5	520.2	2.352	2.525	6.9%	0.63
PM-2.6	65.97	65.62	65.35	101.52	101.47	101.54	65.65	101.51	1238.3	531.3	2.331	2.525	7.7%	0.65
PM-3.1	63.98	63.34	63.65	101.56	101.62	101.34	63.66	101.51	1236.4	515.1	2.400	2.521	4.8%	0.63
PM-3.2	63.61	63.68	63.71	101.68	101.47	101.53	63.67	101.56	1239.3	515.8	2.403	2.521	4.7%	0.63
PM-3.3	64.45	64.4	64.12	101.5	101.72	101.62	64.32	101.61	1256.7	521.6	2.409	2.521	4.4%	0.63
PM-3.4	64.26	63.49	63.79	101.26	101.65	101.49	63.85	101.47	1238.4	516.3	2.399	2.521	4.8%	0.63
PM-3.5	63.3	63.24	62.15	101.64	101.84	101.97	62.90	101.82	1210.3	512.1	2.363	2.521	6.3%	0.62
PM-3.6	62.59	62.28	61.9	101.5	101.69	101.73	62.26	101.64	1209.9	505.1	2.395	2.521	5.0%	0.61
PM-4.1	61.96	62.75	62.22	101.42	101.47	101.68	62.31	101.52	1193.6	504.4	2.366	2.515	5.9%	0.61
PM-4.2	63.85	62.82	63.78	101.57	101.68	101.61	63.48	101.62	1206.3	514.9	2.343	2.515	6.8%	0.62
PM-4.3	62.96	62.71	62.53	101.35	101.49	101.6	62.73	101.48	1201.3	507.4	2.368	2.515	5.9%	0.62
PM-4.4	63.41	63.21	63.5	101.35	101.68	101.61	63.37	101.55	1206.9	513.2	2.351	2.515	6.5%	0.62
PM-4.5	62.67	62.41	62.18	101.46	101.5	101.51	62.42	101.49	1208.4	505.0	2.393	2.515	4.8%	0.62
PM-4.6	62.39	62.37	62.03	101.5	101.82	101.51	62.26	101.61	1204.9	504.9	2.386	2.515	5.1%	0.61

Tableau A VII.63 Résultats ITSM à -20°C mélanges TR-1

ID	TR-1.1		TR-1.2		TR-1.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14589	-14589	-14796	-14679	-14677	-14673
Période de répétition (sec)	2.98	3.07	3.02	3.07	2.99	2.99
temps de montée (mSec)	125.9	125.9	126.0	126.2	126.2	125.8
Déformation maximale (micron)	5.05	5.03	4.80	4.56	5.28	5.29
Ratio de montée	0.61	0.59	0.61	0.58	0.59	0.60
Température d'essai (°C)	-20.0	-20.1	-20.1	-20.0	-20.1	-20.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	26293	26403	28141	29408	25635	25646
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	26521	26167	28294	28852	25392	25399
ID	TR-1.4		TR-1.5		TR-1.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14718	-14791	-14721	-14697	-14752	-14701
Période de répétition (sec)	2.93	3.02	3.01	3.06	2.97	2.94
temps de montée (mSec)	125.9	125.8	126.0	126.0	126.0	126.1
Déformation maximale (micron)	4.69	4.32	4.64	4.65	4.33	4.33
Ratio de montée	0.60	0.58	0.60	0.60	0.60	0.60
Température d'essai (°C)	-20.0	-20.1	-20.0	-20.2	-20.0	-20.5
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	28940	31588	29370	29234	31459	31356
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	29040	31040	29432	29119	31537	31398

Tableau A VII.64 Résultats ITSM à -20°C mélanges TR-2

ID	TR-2.1		TR-2.2		TR-2.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14779	-14711	-14716	-14761	-14720	-14797
Période de répétition (sec)	3.02	3.08	2.99	3.00	3.03	2.95
temps de montée (mSec)	126.3	125.9	126.1	125.9	125.7	126.1
Déformation maximale (micron)	4.86	4.71	5.06	5.06	3.97	4.75
Ratio de montée	0.60	0.57	0.58	0.60	0.57	0.59
Température d'essai (°C)	-20.1	-20.0	-20.2	-20.0	-20.0	-20.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	28925	29720	29641	29641	36467	30620
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	29040	28914	29086	29086	35493	30400
ID	TR-2.4		TR-2.5		TR-2.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14702	-14696	-14718	-14752	-14767	-14764
Période de répétition (sec)	3.01	2.95	3.03	2.94	2.95	3.01
temps de montée (mSec)	125.8	125.9	126.1	126.1	126.1	125.8
Déformation maximale (micron)	4.30	4.83	4.77	4.56	5.10	5.08
Ratio de montée	0.60	0.59	0.59	0.60	0.60	0.60
Température d'essai (°C)	-20.2	-20.3	-20.0	-20.2	-20.5	-20.4
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	32808	28944	29190	30625	27749	27951
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	32736	28796	28866	30522	27723	27903

Tableau A VII. 65 Résultats ITSM à -20°C mélanges TR-3

ID	TR-3.1		TR-3.2		TR-3.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14748	-14658	-14694	-14689	-14692	-14688
Période de répétition (sec)	2.99	2.97	3.00	3.00	3.01	2.94
temps de montée (mSec)	126.2	121.7	125.7	125.9	126.1	126.2
Déformation maximale (micron)	4.71	4.10	4.98	4.88	4.65	4.47
Ratio de montée	0.57	0.58	0.61	0.58	0.60	0.59
Température d'essai (°C)	-19.1	-19.4	-19.9	-19.9	-19.9	-20.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	31289	35705	31188	31842	30048	31270
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	30473	34961	31435	31322	30027	31022
ID	TR-3.4		TR-3.5		TR-3.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14688	-14682	-14698	-14693	-14674	-14686
Période de répétition (sec)	2.98	2.99	3.01	2.96	2.98	2.99
temps de montée (mSec)	125.8	126.1	126.1	125.7	125.8	126.0
Déformation maximale (micron)	4.37	4.17	4.86	4.41	4.50	4.40
Ratio de montée	0.58	0.58	0.60	0.57	0.60	0.60
Température d'essai (°C)	-20.2	-20.3	-20.4	-20.1	-20.2	-20.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	32134	33711	29088	31985	31924	32601
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	31702	33027	28977	31244	31990	32569

Tableau A VII.66 Résultats ITSM à -20°C mélanges TR-4

ID	TR-4.1		TR-4.2		TR-4.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14678	-14583	-14688	-14671	-14676	-14716
Période de répétition (sec)	3.02	2.98	2.98	3.62	3.04	2.98
temps de montée (mSec)	126.0	125.7	125.7	125.4	126.2	126.0
Déformation maximale (micron)	4.57	4.61	4.16	2.91	3.77	4.34
Ratio de montée	0.58	0.58	0.55	0.58	0.58	0.60
Température d'essai (°C)	-20.0	-19.9	-19.9	-20.1	-20.0	-19.9
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	31936	31494	33816	50174	37656	32596
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	31341	31027	32204	49341	37074	32458
ID	TR-4.4		TR-4.5		TR-4.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14697	-14706	-14709	-14656	-14697	-14671
Période de répétition (sec)	3.02	3.08	3.01	3.01	2.97	3.00
temps de montée (mSec)	126.2	125.5	100.4	126.1	126.1	125.1
Déformation maximale (micron)	4.38	4.46	4.78	4.02	4.61	4.58
Ratio de montée	0.57	0.53	0.57	0.58	0.59	0.60
Température d'essai (°C)	-19.9	-20.0	-19.8	-19.9	-20.0	-20.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	32353	31801	29318	34695	30606	30666
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	31367	29967	28444	34035	30421	30631

Tableau A VII.67 Résultats ITSM à -20°C mélanges HB-1

ID	HB-1.1		HB-1.2		HB-1.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14702	-14727	-14773	-14762	-14761	-14764
Période de répétition (sec)	3.00	3.00	2.98	2.93	2.99	3.01
temps de monté (mSec)	125.7	126.0	126.5	125.9	126.1	125.9
Déformation maximale (micron)	4.71	4.82	4.98	4.72	5.09	4.95
Ratio de monté	0.59	0.60	0.60	0.57	0.59	0.60
Température d'essai (°C)	-19.2	-19.2	-19.8	-20.1	-20.2	-20.4
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	31410	30743	29697	31283	29098	29957
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	31185	30647	29653	30425	28893	29900
ID	HB-1.4		HB-1.5		HB-1.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14761	-14750	-14701	-14720	-14697	-14673
Période de répétition (sec)	2.96	2.92	2.98	3.02	2.99	3.03
temps de monté (mSec)	125.9	126.0	125.8	126.0	125.8	126.1
Déformation maximale (micron)	5.40	5.12	5.00	4.99	4.41	4.75
Ratio de monté	0.59	0.60	0.60	0.58	0.58	0.60
Température d'essai (°C)	-20.2	-20.0	-20.0	-20.0	-20.6	-19.7
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	26685	28129	29001	29025	33610	31168
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	26548	28170	29004	28470	33005	31177

Tableau A VII.68 Résultats ITSM à -20°C mélanges HB-2

ID	HB-2.1		HB-2.2		HB-2.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14698	-14693	-14706	-14703	-14688	-14688
Période de répétition (sec)	3.02	2.99	3.02	2.97	2.99	2.99
temps de monté (mSec)	125.9	125.8	126.2	125.9	125.9	125.7
Déformation maximale (micron)	4.63	4.60	4.63	4.59	4.35	4.55
Ratio de monté	0.59	0.59	0.60	0.57	0.59	0.58
Température d'essai (°C)	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.2	-20.2
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	31346	31567	32312	32566	32339	30976
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	31025	31194	32291	31773	31991	30466
ID	HB-2.4		HB-2.5		HB-2.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14690	-14696	-14714	-14685	-14692	-14694
Période de répétition (sec)	3.04	3.01	3.00	2.97	3.05	3.01
temps de monté (mSec)	125.7	126.1	126.0	126.1	125.9	125.2
Déformation maximale (micron)	4.60	4.46	4.74	4.86	4.83	4.52
Ratio de monté	0.59	0.59	0.58	0.60	0.58	0.59
Température d'essai (°C)	-20.1	-20.1	-20.0	-20.0	-19.9	-19.9
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	30387	31340	30994	30144	30700	32807
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	30068	31188	30549	30051	30224	32493

Tableau A VII.69 Résultats ITSM à -20°C mélanges HB-3

ID	HB-3.1		HB-3.2		HB-3.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14704	-14751	-14705	-14686	-14747	-14733
Période de répétition (sec)	3.01	3.02	3.05	2.97	2.99	3.00
temps de montée (mSec)	126.1	126.1	125.9	126.5	126.0	126.1
Déformation maximale (micron)	4.41	4.55	4.77	4.75	4.57	4.50
Ratio de montée	0.57	0.60	0.59	0.60	0.59	0.58
Température d'essai (°C)	-20.0	-20.1	-20.0	-19.9	-20.1	-20.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	34198	31187	31508	31653	32290	33261
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	33360	31178	31168	31554	32063	32669
ID	HB-3.4		HB-3.5		HB-3.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14702	-14709	-14749	-14790	-14768	-14751
Période de répétition (sec)	3.00	2.98	3.04	2.94	3.00	3.01
temps de montée (mSec)	126.0	126.2	125.9	126.1	126.1	126.0
Déformation maximale (micron)	4.10	4.13	4.48	4.50	4.43	4.85
Ratio de montée	0.55	0.58	0.56	0.57	0.59	0.59
Température d'essai (°C)	-20.6	-20.6	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	35911	35625	34125	34063	34098	31216
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	34356	34891	32800	33286	33768	30942

Tableau A VII.70 Résultats ITSM à -20°C mélanges HB-4

ID	HB-4.1		HB-4.2		HB-4.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14675	-14687	-14667	-14683	-14694	-14687
Période de répétition (sec)	3.05	3.02	2.93	3.01	2.97	3.03
temps de montée (mSec)	125.7	125.8	126.0	126.0	126.6	125.6
Déformation maximale (micron)	4.86	4.67	4.93	4.90	4.53	4.46
Ratio de montée	0.60	0.58	0.60	0.58	0.59	0.57
Température d'essai (°C)	-20.3	-20.2	-20.2	-20.2	-21.0	-20.4
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	32537	33888	30740	30949	32434	32886
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	32451	33279	30759	30526	32130	32006
ID	HB-4.4		HB-4.5		HB-4.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14678	-14717	-14678	-14705	-14687	-14747
Période de répétition (sec)	2.99	3.01	3.01	3.01	3.00	3.02
temps de montée (mSec)	125.9	126.0	126.1	126.1	126.0	126.1
Déformation maximale (micron)	4.90	4.75	4.61	4.86	4.75	4.78
Ratio de montée	0.60	0.56	0.58	0.66	0.59	0.59
Température d'essai (°C)	-20.1	-20.0	-19.9	-20.1	-20.2	-20.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	30343	31358	31821	30232	31719	31265
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	30220	30294	31374	31710	31475	30890

Tableau A VII.71 Résultats ITSM à -20°C mélanges PM-1

ID	PM-1.1		PM-1.2		PM-1.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14695	-14693	-14686	-14666	-14680	-14686
Période de répétition (sec)	3.02	3.00	2.98	3.00	3.01	2.98
temps de monté (mSec)	125.9	125.9	126.2	126.0	126.0	125.5
Déformation maximale (micron)	4.99	4.54	4.37	4.70	4.59	4.70
Ratio de monté	0.60	0.58	0.57	0.58	0.59	0.58
Température d'essai (°C)	-19.2	-20.4	-19.9	-20.5	-20.4	-20.4
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	28569	31661	32889	30575	31979	31240
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	28462	31220	32084	30164	31719	30777
ID	PM-1.4		PM-1.5		PM-1.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14680	-14704	-14707	-14717	-14701	-14691
Période de répétition (sec)	2.97	3.00	3.02	2.97	2.92	3.02
temps de monté (mSec)	125.8	126.2	125.7	126.1	125.7	125.6
Déformation maximale (micron)	4.20	4.40	4.67	4.25	4.97	4.64
Ratio de monté	0.58	0.59	0.59	0.57	0.61	0.60
Température d'essai (°C)	-20.5	-20.4	-20.1	-20.4	-20.3	-20.3
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	33623	32158	30399	33458	28842	30877
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	32974	31832	30073	32532	29129	30797

Tableau A VII.72 Résultats ITSM à -20°C mélanges PM-2

ID	PM-2.1		PM-2.2		PM-2.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14686	-14686	-14690	-14699	-14700	-14682
Période de répétition (sec)	2.96	2.96	3.00	3.01	2.91	2.98
temps de monté (mSec)	126.1	126.1	126.0	126.0	126.2	126.1
Déformation maximale (micron)	4.71	4.71	4.51	4.26	4.43	4.72
Ratio de monté	0.60	0.60	0.59	0.55	0.58	0.59
Température d'essai (°C)	-20.1	-20.1	-20.0	-19.9	-20.0	-20.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	31554	31554	32295	34280	32404	30359
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	31490	31490	32000	32891	31713	30035
ID	PM-2.4		PM-2.5		PM-2.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14684	-14703	-14694	-14698	-14702	-14700
Période de répétition (sec)	3.03	2.95	2.98	3.02	3.01	2.96
temps de monté (mSec)	126.1	126.2	126.2	126.1	125.9	125.6
Déformation maximale (micron)	4.70	4.64	4.72	4.60	4.41	4.53
Ratio de monté	0.57	0.59	0.60	0.58	0.59	0.58
Température d'essai (°C)	-20.0	-20.0	-19.9	-19.9	-20.0	-20.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	30773	31235	30070	30890	31498	30636
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	29877	31086	30187	30350	31102	30209

Tableau A VII.73 Résultats ITSM à -20°C mélanges PM-3

ID	PM-3.1		PM-3.2		PM-3.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14706	-14715	-14703	-14747	-14697	-14720
Période de répétition (sec)	3.00	2.95	2.95	3.01	3.06	2.93
temps de montée (mSec)	126.0	126.0	126.2	126.1	125.7	126.0
Déformation maximale (micron)	4.39	4.50	4.64	4.73	4.48	4.33
Ratio de montée	0.58	0.57	0.59	0.60	0.59	0.56
Température d'essai (°C)	-20.1	-20.0	-20.0	-20.1	-20.0	-19.9
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	32602	31869	30852	30354	31652	32757
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	32082	31151	30706	30451	31364	31651
ID	PM-3.4		PM-3.5		PM-3.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14773	-14678	-14710	-14708	-14707	-14749
Période de répétition (sec)	3.01	3.00	2.97	2.99	2.96	3.01
temps de montée (mSec)	125.9	125.9	126.2	126.0	126.2	125.9
Déformation maximale (micron)	4.59	4.66	4.57	4.25	5.75	4.46
Ratio de montée	0.60	0.59	0.58	0.58	0.83	0.60
Température d'essai (°C)	-19.9	-20.0	-20.1	-20.2	-20.0	-20.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	31228	30650	31706	34125	25466	32988
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	31254	30354	31243	33452	30298	32898

Tableau A VII.74 Résultats ITSM à -20°C mélanges PM-4

ID	PM-4.1		PM-4.2		PM-4.3	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14704	-14726	-14681	-14674	-14705	-14708
Période de répétition (sec)	3.02	3.00	2.99	2.97	3.03	2.96
temps de montée (mSec)	126.1	126.1	126.2	125.6	125.9	125.9
Déformation maximale (micron)	4.48	4.65	4.67	4.60	4.95	4.86
Ratio de montée	0.57	0.59	0.60	0.59	0.60	0.59
Température d'essai (°C)	-20.1	-20.2	-20.4	-20.0	-20.0	-20.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	32695	31365	30708	31152	29390	29943
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	31795	31175	30637	30815	29282	29727
ID	PM-4.4		PM-4.5		PM-4.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-14730	-14672	-14802	-14739	-14732	-14698
Période de répétition (sec)	2.99	3.03	3.03	2.97	2.96	2.98
temps de montée (mSec)	126.0	126.0	125.9	126.2	126.1	125.9
Déformation maximale (micron)	4.69	4.64	4.64	4.63	4.45	4.68
Ratio de montée	0.59	0.59	0.59	0.60	0.62	0.59
Température d'essai (°C)	-20.0	-20.0	-20.2	-20.2	-20.3	-20.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	30728	30970	31674	31632	32993	30924
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	30556	30629	31344	31689	33437	30715

Tableau A VII.75 Résultats ITSM à -10°C mélanges TR-1

ID	TR-1.4		TR-1.5		TR-1.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10795	-10793	-10808	-10786	-10815	-10787
Période de répétition (sec)	3.01	2.92	3.01	3.02	3.05	2.96
temps de montée (mSec)	126.1	126.0	125.7	125.7	125.7	125.4
Déformation maximale (micron)	4.84	5.08	5.07	4.77	4.91	5.17
Ratio de montée	0.59	0.61	0.59	0.58	0.58	0.61
Température d'essai (°C)	-9.8	-10.0	-10.0	-10.0	-9.9	-10.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	20591	19583	19710	20981	20318	19257
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	20487	19676	19551	20669	20035	19338

Tableau A VII.76 Résultats ITSM à -10°C mélanges TR-2

ID	TR-2.2		TR-2.4		TR-2.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10793	-10806	-10805	-10777	-10789	-10780
Période de répétition (sec)	3.00	2.97	3.03	3.02	3.07	2.99
temps de montée (mSec)	125.7	125.8	125.6	125.7	126.1	125.6
Déformation maximale (micron)	5.30	5.24	4.79	5.00	5.01	4.93
Ratio de montée	0.59	0.58	0.59	0.60	0.59	0.59
Température d'essai (°C)	-10.0	-10.0	-10.0	-10.1	-10.0	-10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	20751	21041	21463	20496	20409	20693
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	20654	20720	21299	20431	20250	20577

Tableau A VII.77 Résultats ITSM à -10°C mélanges TR-3

ID	TR-3.2		TR-3.4		TR-3.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10807	-10809	-10791	-10794	-10809	-10780
Période de répétition (sec)	3.00	2.97	3.01	2.99	3.02	2.97
temps de montée (mSec)	125.7	125.8	125.7	125.0	125.9	125.7
Déformation maximale (micron)	5.28	5.24	5.25	5.29	5.12	5.30
Ratio de montée	0.60	0.60	0.60	0.61	0.58	0.59
Température d'essai (°C)	-10.0	-10.0	-10.1	-9.9	-10.1	-10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	21624	21809	19668	19520	20280	19534
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	21571	21886	19747	19702	20013	19449

Tableau A VII.78 Résultats ITSM à -10°C mélanges TR-4

ID	TR-4.1		TR-4.2		TR-4.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10798	-10830	-10816	-10796	-10807	-10810
Période de répétition (sec)	2.98	3.04	3.01	3.00	3.00	3.07
temps de monté (mSec)	125.7	125.4	125.7	126.0	125.7	125.9
Déformation maximale (micron)	4.60	4.92	4.61	5.00	4.61	4.13
Ratio de monté	0.60	0.59	0.59	1.00	0.60	0.60
Température d'essai (°C)	-10.0	-9.9	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	23388	21890	22445	22441	22917	25262
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	23375	21757	22314	22582	22845	25160

Tableau A VII.79 Résultats ITSM à -10°C mélanges HB-1

ID	HB-1.2		HB-1.3		HB-1.4	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10807	-10805	-10795	-10788	-10819	-10811
Période de répétition (sec)	3.00	2.99	3.00	3.02	3.01	3.03
temps de monté (mSec)	126.0	126.0	126.0	126.1	125.9	126.1
Déformation maximale (micron)	5.13	5.39	5.34	5.30	4.92	4.99
Ratio de monté	0.61	0.60	0.61	0.60	0.61	0.59
Température d'essai (°C)	-10.0	-9.9	-10.0	-10.0	-9.9	-10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	20868	20052	20264	20411	21472	21129
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	20975	20055	20357	20414	21594	20948

Tableau A VII.80 Résultats ITSM à -10°C mélanges HB-2

ID	HB-2.2		HB-2.4		HB-2.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10800	-10834	-10791	-10804	-10819	-10780
Période de répétition (sec)	3.00	2.96	2.98	2.96	3.02	2.96
temps de monté (mSec)	126.0	125.9	126.0	125.8	125.9	125.7
Déformation maximale (micron)	4.50	4.84	4.33	4.60	5.19	5.08
Ratio de monté	0.58	0.61	0.59	0.59	0.60	0.59
Température d'essai (°C)	-10.0	-10.0	-10.0	-10.1	-10.2	-10.3
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	24601	22757	23752	22345	20797	21219
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	24230	22972	23491	22226	20748	20998

Tableau A VII.81 Résultats ITSM à -10°C mélanges HB-3

ID	HB-3.2		HB-3.5		HB-3.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10864	-10797	-10795	-10855	-10789	-10799
Période de répétition (sec)	3.02	2.96	3.03	2.96	2.98	2.95
temps de montée (mSec)	126.1	126.0	125.7	126.2	126.0	125.5
Déformation maximale (micron)	4.60	4.64	5.11	4.90	5.19	5.28
Ratio de montée	0.59	0.60	0.59	0.59	0.60	0.61
Température d'essai (°C)	-10.1	-10.0	-10.0	-9.8	-10.0	-10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	24157	23829	21924	22964	21312	21006
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	23904	23867	21713	22725	21322	21208

Tableau A VII.82 Résultats ITSM à -10°C mélanges HB-4

ID	HB-4.2		HB-4.3		HB-4.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10786	-10778	-10801	-10772	-10753	-10774
Période de répétition (sec)	2.98	2.98	2.98	3.01	2.97	2.98
temps de montée (mSec)	125.9	126.1	126.0	125.7	126.0	126.1
Déformation maximale (micron)	4.57	4.56	4.87	4.81	4.79	4.89
Ratio de montée	0.59	0.59	0.61	0.60	0.60	0.60
Température d'essai (°C)	-10.0	-9.9	-10.0	-10.0	-10.1	-10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	24378	24506	22159	22381	22718	22314
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	24193	24391	22280	22370	22643	22397

Tableau A VII.83 Résultats ITSM à -10°C mélanges PM-1

ID	PM-1.2		PM-1.3		PM-1.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10776	-10766	-10784	-10779	-10783	-10803
Période de répétition (sec)	2.99	2.95	2.97	2.97	3.03	3.03
temps de montée (mSec)	126.0	125.7	125.6	125.9	126.0	125.5
Déformation maximale (micron)	5.21	5.39	5.30	5.38	5.23	5.12
Ratio de montée	0.59	0.57	0.60	0.61	0.60	0.60
Température d'essai (°C)	-10.0	-9.9	-10.0	-10.0	-9.9	-10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	20281	19561	20347	20052	19906	20373
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	20144	19032	20325	20267	19849	20435

Tableau A VII.84 Résultats ITSM à -10°C mélanges PM-2

ID	PM-2.3		PM-2.4		PM-2.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10799	-10793	-10816	-10797	-10807	-10789
Période de répétition (sec)	2.97	3.00	3.00	3.00	2.98	3.03
temps de monté (mSec)	125.7	125.7	125.3	126.1	125.5	125.6
Déformation maximale (micron)	4.94	5.43	5.37	3.15	5.15	4.52
Ratio de monté	0.59	0.60	0.60	0.59	0.59	0.60
Température d'essai (°C)	-10.0	-10.0	-10.1	-10.3	-10.0	-9.9
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	21444	19409	19659	20010	20551	22610
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	21278	19365	19630	19896	20454	22631

Tableau A VII.85 Résultats ITSM à -10°C mélanges PM-3

ID	PM-3.1		PM-3.2		PM-3.4	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10805	-10817	-10821	-10791	-10816	-10793
Période de répétition (sec)	2.98	3.05	2.98	3.00	2.97	3.00
temps de monté (mSec)	125.7	125.7	126.0	125.9	125.7	125.6
Déformation maximale (micron)	4.91	4.80	4.90	5.19	5.02	5.19
Ratio de monté	0.59	0.58	0.59	0.63	0.60	0.60
Température d'essai (°C)	-10.0	-9.9	-9.5	-10.0	-10.0	-10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	21431	21947	21519	20258	20922	20208
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	21237	21568	21416	20665	20923	20214

Tableau A VII.86 Résultats ITSM à -10°C mélanges PM-4

ID	PM-4.1		PM-4.3		PM-4.4	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-10812	-10799	-10787	-10789	-10797	-10772
Période de répétition (sec)	3.02	2.98	2.99	3.00	2.96	2.98
temps de monté (mSec)	125.9	125.9	125.7	125.4	126.2	125.9
Déformation maximale (micron)	4.61	4.72	4.08	4.79	4.95	4.64
Ratio de monté	0.61	0.62	0.59	0.61	0.60	0.60
Température d'essai (°C)	-10.0	-9.9	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	23316	22748	26117	22278	21335	23383
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	23415	23038	25873	22374	21417	23321

Tableau A VII.87 Résultats ITSM à 0°C mélanges TR-1

ID	TR-1.4		TR-1.5		TR-1.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6309	-6310	-6294	-6315	-6316	-6306
Période de répétition (sec)	2.96	3.01	3.03	3.04	2.98	2.98
temps de montée (mSec)	126.1	126.2	126.1	126.1	125.9	126.2
Déformation maximale (micron)	5.32	5.18	5.26	5.12	4.97	5.24
Ratio de montée	0.61	0.61	0.61	0.61	0.62	0.60
Température d'essai (°C)	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	10929	11255	11074	11414	11713	11095
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	10989	11304	11123	11491	11840	11118

Tableau A VII.88 Résultats ITSM à 0°C mélanges TR-2

ID	TR-2.2		TR-2.4		TR-2.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6298	-6310	-6314	-6300	-6310	-6305
Période de répétition (sec)	3.00	2.96	3.05	3.03	3.01	3.05
temps de montée (mSec)	126.5	125.9	126.1	126.0	125.9	126.0
Déformation maximale (micron)	5.43	5.53	5.14	5.21	5.28	5.34
Ratio de montée	0.61	0.61	0.60	0.60	0.63	0.59
Température d'essai (°C)	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	11823	11630	11699	11514	11305	11199
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	11896	11705	11729	11551	11516	11113

Tableau A VII.89 Résultats ITSM à 0°C mélanges TR-3

ID	TR-3.2		TR-3.4		TR-3.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6305	-6303	-6304	-6279	-6302	-6305
Période de répétition (sec)	3.01	3.02	3.00	2.98	3.02	2.99
temps de montée (mSec)	126.1	126.1	126.5	125.9	126.6	125.8
Déformation maximale (micron)	6.21	6.19	5.61	5.51	5.16	5.06
Ratio de montée	0.61	0.62	0.60	0.61	0.59	0.61
Température d'essai (°C)	0.1	-0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	10742	10762	10743	10902	11741	11992
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	10834	10880	10769	11014	11692	12080

Tableau A VII.90 Résultats ITSM à 0°C mélanges TR-4

ID	TR-4.1		TR-4.2		TR-4.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6302	-6314	-6310	-6302	-6302	-6309
Période de répétition (sec)	3.00	3.00	3.01	2.99	3.02	3.01
temps de montée (mSec)	125.9	126.1	125.8	126.0	125.8	126.2
Déformation maximale (micron)	5.06	5.03	4.82	5.07	5.07	5.24
Ratio de montée	0.61	0.60	0.60	0.61	0.61	0.60
Température d'essai (°C)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	12409	12496	12547	11906	11987	11606
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	12477	12476	12572	11998	12093	11647

Tableau A VII.91 ITSM à 0°C mélanges HB-1

ID	HB-1.2		HB-1.3		HB-1.4	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6307	-6302	-6315	-6305	-6307	-6314
Période de répétition (sec)	2.99	2.97	2.99	3.03	3.00	3.03
temps de montée (mSec)	126.0	126.0	126.5	125.9	126.1	126.2
Déformation maximale (micron)	6.03	6.10	5.96	6.08	5.81	5.79
Ratio de montée	0.61	0.62	0.61	0.63	0.61	0.61
Température d'essai (°C)	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	10467	10337	10636	10402	10590	10642
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	10578	10481	10720	10590	10665	10748

Tableau A VII.92 ITSM à 0°C mélanges HB-2

ID	HB-2.2		HB-2.4		HB-2.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6294	-6316	-6301	-6304	-6308	-6315
Période de répétition (sec)	3.05	2.99	2.99	3.05	3.08	2.98
temps de montée (mSec)	126.0	125.8	126.1	126.1	126.1	125.9
Déformation maximale (micron)	5.51	5.61	5.41	5.35	5.22	5.28
Ratio de montée	0.61	0.61	0.61	0.62	0.59	0.61
Température d'essai (°C)	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	11619	11459	11077	11212	12198	12075
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	11681	11574	11137	11389	12086	12205

Tableau A VII.93 ITSM à 0°C mélanges HB-3

ID	HB-3.2		HB-3.5		HB-3.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6312	-6307	-6309	-6301	-6304	-6303
Période de répétition (sec)	3.02	3.06	3.00	2.96	2.93	2.98
temps de montée (mSec)	126.0	126.0	126.5	126.1	125.8	126.2
Déformation maximale (micron)	5.70	5.73	5.79	5.87	5.88	5.90
Ratio de montée	0.61	0.62	0.61	0.61	0.62	0.61
Température d'essai (°C)	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	11270	11192	11300	11141	10994	10955
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	11374	11341	11415	11230	11160	11040

Tableau A VII.94 ITSM à 0°C mélanges HB-4

ID	HB-4.2		HB-4.3		HB-4.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6315	-6299	-6298	-6296	-6310	-6305
Période de répétition (sec)	2.96	2.98	2.97	2.99	3.02	3.00
temps de montée (mSec)	126.1	126.0	126.1	126.2	126.4	126.1
Déformation maximale (micron)	5.67	5.65	5.30	5.19	5.39	5.79
Ratio de montée	0.61	0.60	0.61	0.61	0.61	0.62
Température d'essai (°C)	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	12009	12030	11870	12113	11851	11037
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	12134	12062	11967	12161	11968	11199

Tableau A VII.95 ITSM à 0°C mélanges PM-1

ID	PM-1.2		PM-1.3		PM-1.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6305	-6310	-6307	-6311	-6306	-6299
Période de répétition (sec)	3.00	3.00	2.98	2.98	2.99	2.97
temps de montée (mSec)	126.4	126.0	126.1	126.0	126.2	126.1
Déformation maximale (micron)	6.06	6.09	5.90	5.91	5.98	5.72
Ratio de montée	0.62	0.61	0.61	0.61	0.62	0.61
Température d'essai (°C)	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	10190	10155	10492	10687	10341	10634
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	10368	10205	10577	10778	10472	10747

Tableau A VII.96 ITSM à 0°C mélanges PM-2

ID	PM-2.3		PM-2.4		PM-2.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6312	-6311	-6303	-6314	-6305	-6307
Période de répétition (sec)	3.04	3.00	2.97	3.03	2.99	2.99
temps de monté (mSec)	126.0	125.8	126.2	126.2	126.0	126.1
Déformation maximale (micron)	6.10	6.11	5.31	5.28	5.40	5.33
Ratio de monté	0.61	0.62	0.61	0.61	0.61	0.61
Température d'essai (°C)	-0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	10101	10076	11579	11656	11572	11602
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	10181	10183	11682	11745	11643	11690

Tableau A VII.97 ITSM à 0°C mélanges PM-3

ID	PM-3.1		PM-3.2		PM-3.4	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6306	-6308	-6311	-6314	-6304	-6315
Période de répétition (sec)	3.02	3.00	2.96	3.00	3.06	2.96
temps de monté (mSec)	126.2	126.1	126.1	126.5	126.5	126.1
Déformation maximale (micron)	5.50	5.38	5.81	6.11	5.12	5.32
Ratio de monté	0.60	0.61	0.60	0.62	0.60	0.62
Température d'essai (°C)	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	11032	11270	10572	10066	12332	11521
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	11039	11342	10591	10178	12343	11689

Tableau A VII.98 ITSM à 0°C mélanges PM-4

ID	PM-4.1		PM-4.3		PM-4.4	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-6307	-6310	-6306	-6304	-6309	-6312
Période de répétition (sec)	2.96	2.98	3.01	2.97	2.96	2.99
temps de monté (mSec)	126.1	126.0	126.1	126.0	126.0	126.0
Déformation maximale (micron)	5.38	5.17	5.68	5.52	5.10	4.96
Ratio de monté	0.60	0.61	0.60	0.61	0.61	0.61
Température d'essai (°C)	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	11591	12059	10875	11180	12281	12644
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	11594	12166	10901	11244	12412	12758

Tableau A VII.99 Résultats ITSM à 10°C mélanges TR-1

ID	TR-1.4		TR-1.5		TR-1.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1786	-1784	-1780	-1780	-1776	-1776
Période de répétition (sec)	3.05	2.97	2.96	2.99	3.00	3.01
temps de montée (mSec)	124.0	124.0	123.5	124.2	124.9	124.6
Déformation maximale (micron)	3.80	3.80	3.66	3.60	3.71	3.84
Ratio de montée	0.61	0.62	0.61	0.61	0.62	0.62
Température d'essai (°C)	10.1	10.1	10.0	10.0	10.1	10.1
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4333	4330	4501	4571	4412	4270
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4356	4371	4531	4585	4453	4319

Tableau A VII.100 Résultats ITSM à 10°C mélanges TR-2

ID	TR-2.2		TR-2.4		TR-2.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1783	-1784	-1779	-1782	-1774	-1772
Période de répétition (sec)	2.97	3.02	2.99	2.98	3.01	2.94
temps de montée (mSec)	123.6	125.4	124.3	124.5	124.2	123.7
Déformation maximale (micron)	4.28	4.13	3.65	3.84	3.58	3.63
Ratio de montée	0.61	0.61	0.61	0.61	0.60	0.60
Température d'essai (°C)	10.1	10.1	10.0	9.9	10.0	10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4245	4410	4634	4411	4689	4632
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4276	4447	4662	4449	4694	4640

Tableau A VII.101 Résultats ITSM à 10°C mélanges TR-3

ID	TR-3.2		TR-3.4		TR-3.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1781	-1782	-1784	-1780	-1781	-1782
Période de répétition (sec)	2.95	2.99	2.98	2.97	2.99	3.02
temps de montée (mSec)	124.6	124.9	124.5	124.7	124.7	124.9
Déformation maximale (micron)	4.24	4.26	3.93	3.95	3.44	3.53
Ratio de montée	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.62
Température d'essai (°C)	9.9	9.9	10.0	10.0	10.0	10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4447	4420	4340	4307	4970	4848
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4460	4483	4385	4339	4986	4898

Tableau A VII.102 Résultats ITSM à 10°C mélanges TR-4

ID	TR-4.1		TR-4.2		TR-4.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1786	-1786	-1781	-1785	-1784	-1780
Période de répétition (sec)	2.99	2.98	2.97	3.03	3.02	3.00
temps de montée (mSec)	124.5	123.6	123.3	124.3	124.0	124.8
Déformation maximale (micron)	3.35	3.35	3.18	3.36	3.13	3.25
Ratio de montée	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61
Température d'essai (°C)	10.1	10.0	10.1	10.1	10.0	10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	5312	5311	5372	5085	5491	5278
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	5360	5354	5429	5139	5534	5322

Tableau A VII.103 Résultats ITSM à 10°C mélanges HB-1

ID	HB-1.2		HB-1.3		HB-1.4	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1783	-1781	-1790	-1778	-1789	-1773
Période de répétition (sec)	3.03	3.00	3.04	2.98	2.96	2.90
temps de montée (mSec)	123.2	124.6	124.4	124.6	124.9	124.6
Déformation maximale (micron)	4.41	4.44	4.48	4.66	4.26	4.19
Ratio de montée	0.60	0.60	0.61	0.62	0.62	0.61
Température d'essai (°C)	10.1	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4066	4018	4010	3825	4133	4132
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4076	4023	4031	3860	4187	4147

Tableau A VII.104 Résultats ITSM à 10°C mélanges HB-2

ID	HB-2.2		HB-2.4		HB-2.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1781	-1766	-1789	-1789	-1778	-1779
Période de répétition (sec)	3.04	2.99	3.00	3.00	3.05	2.97
temps de montée (mSec)	124.5	123.6	124.6	124.6	123.2	122.1
Déformation maximale (micron)	4.06	3.93	3.83	3.83	4.17	4.28
Ratio de montée	0.62	0.61	0.62	0.62	0.62	0.61
Température d'essai (°C)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	9.9
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4457	4574	4449	4449	4254	4153
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4507	4589	4502	4502	4294	4172

Tableau A VII.105 Résultats ITSM à 10°C mélanges HB-3

ID	HB-3.2		HB-3.5		HB-3.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1776	-1781	-1787	-1776	-1789	-1779
Période de répétition (sec)	2.99	2.96	2.94	2.99	3.02	3.02
temps de montée (mSec)	124.6	125.0	124.5	124.6	124.4	124.9
Déformation maximale (micron)	4.31	4.12	4.14	4.31	4.14	4.19
Ratio de montée	0.62	0.61	0.61	0.62	0.61	0.60
Température d'essai (°C)	10.0	10.0	9.9	10.0	10.0	10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4280	4429	4480	4280	4191	4083
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4325	4465	4509	4325	4212	4090

Tableau A VII.106 Résultats ITSM à 10°C mélanges HB-4

ID	HB-4.2		HB-4.3		HB-4.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1777	-1778	-1784	-1787	-1780	-1781
Période de répétition (sec)	2.98	2.99	3.00	2.99	3.03	2.97
temps de montée (mSec)	124.8	125.0	125.2	124.9	125.3	122.4
Déformation maximale (micron)	4.10	4.15	3.57	3.88	4.66	4.55
Ratio de montée	0.62	0.62	0.61	0.62	0.62	0.62
Température d'essai (°C)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4485	4433	4998	4604	3872	3963
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4530	4491	5041	4652	3917	4001

Tableau A VII.107 Résultats ITSM à 10°C mélanges PM-1

ID	PM-1.2		PM-1.3		PM-1.5	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1778	-1775	-1766	-1779	-1781	-1778
Période de répétition (sec)	3.00	2.97	2.98	2.97	3.02	3.01
temps de montée (mSec)	124.6	123.2	124.9	125.1	124.2	124.8
Déformation maximale (micron)	4.30	4.54	4.37	4.56	4.52	4.48
Ratio de montée	0.61	0.61	0.61	0.62	0.61	0.61
Température d'essai (°C)	10.0	9.9	10.0	10.0	10.0	10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4047	3832	4040	3906	3804	3826
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4064	3863	4075	3942	3824	3844

Tableau A VII.108 Résultats ITSM à 10°C mélanges PM-2

ID	PM-2.3		PM-2.4		PM-2.6	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1782	-1784	-1777	-1778	-1784	-1775
Période de répétition (sec)	2.99	3.00	3.06	3.01	3.08	2.96
temps de monté (mSec)	124.1	124.6	125.1	124.3	124.7	123.7
Déformation maximale (micron)	3.91	4.04	4.06	3.97	3.84	3.97
Ratio de monté	0.62	0.62	0.61	0.59	0.60	0.61
Température d'essai (°C)	9.9	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4450	4304	4324	4438	4394	4226
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4494	4349	4342	4420	4401	4239

Tableau A VII.109 Résultats ITSM à 10°C mélanges PM-3

ID	PM-3.1		PM-3.2		PM-3.4	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1782	-1781	-1780	-1786	-1786	-1773
Période de répétition (sec)	2.92	2.98	2.99	3.00	2.98	2.95
temps de monté (mSec)	124.0	124.4	124.6	124.3	123.9	124.9
Déformation maximale (micron)	4.12	4.07	4.12	4.27	4.04	4.30
Ratio de monté	0.62	0.61	0.61	0.62	0.62	0.62
Température d'essai (°C)	10.1	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4217	4262	4209	4074	4292	4000
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4255	4297	4233	4131	4332	4039

Tableau A VII.110 Résultats ITSM à 10°C mélanges PM-4

ID	PM-4.1		PM-4.3		PM-4.4	
Angle	0	90	0	90	0	90
Valeur crête (N)	-1779	-1782	-1782	-1781	-1778	-1781
Période de répétition (sec)	2.96	3.04	2.99	3.03	3.05	3.00
temps de monté (mSec)	123.4	123.7	124.3	123.3	124.7	124.2
Déformation maximale (micron)	3.88	3.93	3.72	3.63	4.13	4.12
Ratio de monté	0.61	0.62	0.61	0.61	0.61	0.60
Température d'essai (°C)	10.1	10.0	10.1	10.0	10.0	10.0
module de rigidité mesuré (E) (Mpa)	4556	4508	4737	4852	4219	4234
module de rigidité mesuré (E') (Mpa)	4571	4553	4753	4876	4248	4236

Tableau A VII.111 Essais module par ondes (voir ANNEXE I)

ID	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4		Essai 5		Essai 6		E moy
	f (Hz)	E (Mpa)	f (Hz)	E (Mpa)	f (Hz)	E (Mpa)	f (Hz)	E (Mpa)	f (Hz)	E (Mpa)	f (Hz)	E (Mpa)	
TR-1	16133	42208	16098	42025	16092	41994	16003	41531	15982	41422	15960	41308	41676
TR-2	19086	42171	19036	41950	19004	41809	18915	38195	18804	37748	18745	37512	41977
TR-3	14652	42840	14621	42659	14589	42473	14502	41968	14469	41777	14447	41650	42131
TR-4	15278	42076	15243	41883	15219	41751	15121	41216	15107	41139	15098	41090	41430
HB-1	16142	43451	16035	42877	15982	42594	16076	43096	16030	42850	14695	43128	42999
HB-2	16489	44095	16442	43844	16435	43807	16384	43535	16314	43164	16294	43058	43584
HB-3	15896	43706	15873	43579	15840	43398	15803	43196	15759	42956	15723	42760	43266
HB-4	16353	44107	16347	44074	16307	43859	16208	43328	16181	43184	15723	43104	43609
PM-1	16014	41941	15983	41778	15972	41721	15941	41559	15923	41465	15901	41351	41584
PM-2	15562	42356	15534	42203	15529	42176	15559	42339	15534	42203	15521	42133	42211
PM-3	15759	43164	15741	43065	15723	42967	15779	43274	15769	43219	15755	43142	43152
PM-4	15301	42886	15262	42668	15234	42512	15231	42495	15199	42317	15166	42133	42444

Tableau A VII.112 Résultats IDT et CT_{index} TR-1

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	TR-1.1	TR-1.3	TR-1.5	TR-1.4	TR-1.6	TR-1.2
Work of failure (J)	36.6	34.3	36.4	22.8	35.5	29.2
Failure energy (J/m^2)	5286	4998	5258	3345	5193	4269
P_{max} (kN)	8.19	8.00	9.09	42.48	53.42	47.95
P_{85} (kN)	6.96	6.80	7.73	36.11	45.40	40.76
P_{75} (kN)	6.14	6.00	6.82	31.86	40.06	35.96
P_{65} (kN)	5.32	5.20	5.91	27.61	34.72	31.17
l_{85} (mm)	3.270	3.555	2.640	1.050	1.241	1.146
l_{75} (mm)	3.642	3.906	2.983	1.100	1.252	1.176
l_{65} (mm)	4.029	4.291	3.306	1.200	1.296	1.248
$ m_{75} $ (kN/mm)	2.156	2.173	2.730	56.642	194.237	125.439
CT_{index}	96.6	95.4	62.2	0.7	0.4	0.5
IDT strenght (kPa)	753	742	836	3960	4973	4467

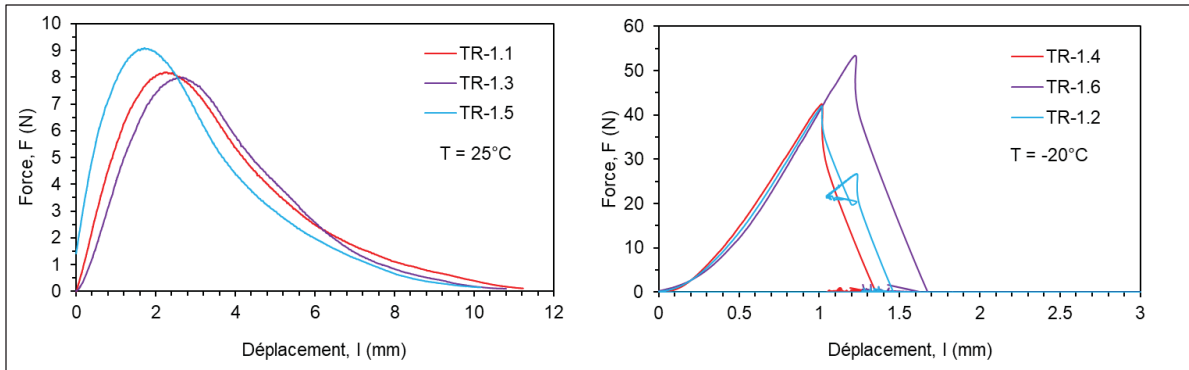


Figure A VII.41 Résultats IDT et CT_{index} TR-1

Tableau A VII.113 Résultats IDT et CT_{index} TR-2

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	TR-2.2	TR-2.4	TR-2.5	TR-2.1	TR-2.3	TR-2.6
Work of failure (J)	33.9	34.3	40.5	21.6	27.5	33.7
Failure energy (J/m^2)	5481	5182	6077	3248	4236	5121
P_{max} (kN)	7.84	8.09	9.09	39.06	45.58	42.27
P_{85} (kN)	6.66	6.88	7.73	33.20	38.74	35.93
P_{75} (kN)	5.88	6.07	6.82	29.30	34.18	31.70
P_{65} (kN)	5.09	5.26	5.91	25.39	29.63	27.48
l_{85} (mm)	2.838	3.500	2.880	1.100	1.315	1.450
l_{75} (mm)	3.205	3.861	3.280	1.123	1.319	1.470
l_{65} (mm)	3.582	4.223	3.704	1.143	1.320	1.480
$ m_{75} $ (kN/mm)	2.107	2.239	2.208	181.677	1823.083	281.807
CT_{index}	80.3	92.5	93.9	0.2	0.0	0.3
IDT strenght (kPa)	805	778	870	3745	4464	4093

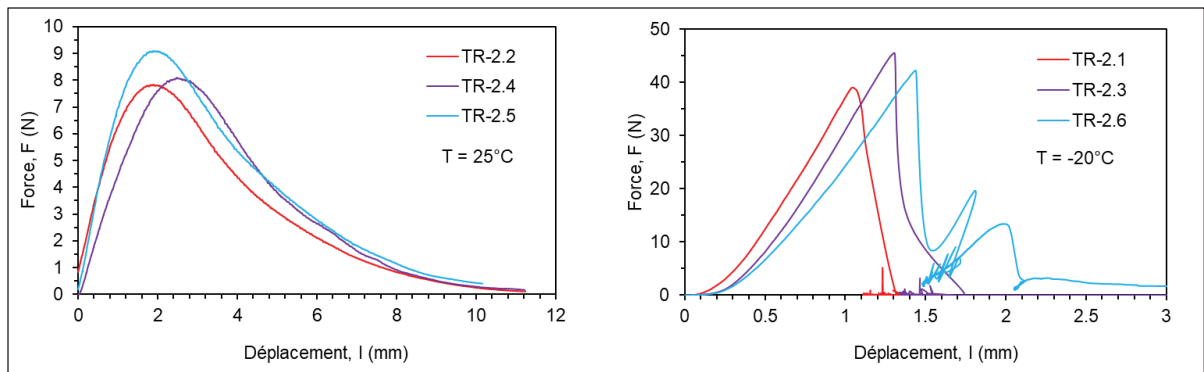
Figure A VII.42 Résultats IDT et CT_{index} TR-2

Tableau A VII.114 Résultats IDT et CT_{index} TR-3

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	TR-3.1	TR-3.2	TR-3.3	TR-3.4	TR-3.5	TR-3.6
Work of failure (J)	32.0	31.7	34.0	26.4	23.6	21.7
Failure energy (J/m^2)	5209	5337	5125	4010	3615	3319
P_{max} (kN)	8.20	7.59	8.79	45.94	40.77	40.26
P_{85} (kN)	6.97	6.45	7.47	39.05	34.65	34.22
P_{75} (kN)	6.15	5.69	6.59	34.46	30.58	30.20
P_{65} (kN)	5.33	4.93	5.71	29.86	26.50	26.17
l_{85} (mm)	2.944	3.048	2.875	1.330	1.330	1.178
l_{75} (mm)	3.285	3.412	3.182	1.360	1.360	1.187
l_{65} (mm)	3.673	3.768	3.500	1.380	1.380	1.199
$ m_{75} $ (kN/mm)	2.252	2.106	2.812	183.780	163.080	383.463
CT_{index}	73.1	80.8	60.0	0.3	0.3	0.1
IDT strenght (kPa)	849	814	844	4450	3969	3920

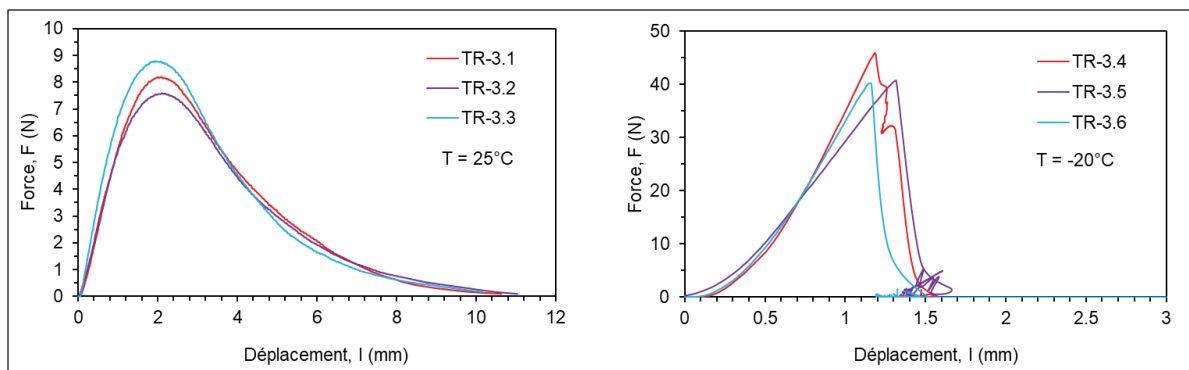
Figure A VII.43 Résultats IDT et CT_{index} TR-3

Tableau A VII.115 Résultats IDT et CT_{index} TR-4

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	TR-4.1	TR-4.3	TR-4.5	TR-4.2	TR-4.4	TR-4.6
Work of failure (J)	38.5	36.9	34.8	32.7	36.9	22.5
Failure energy (J/m^2)	6581	5657	5262	4973	5661	3457
P_{max} (kN)	9.22	8.86	9.19	55.21	54.57	43.16
P_{85} (kN)	7.84	7.53	7.81	46.92	46.38	36.68
P_{75} (kN)	6.91	6.64	6.89	41.40	40.93	32.37
P_{65} (kN)	5.99	5.76	5.97	35.88	35.47	28.05
l_{85} (mm)	2.800	3.448	2.993	1.370	0.250	0.930
l_{75} (mm)	3.174	3.807	3.306	1.400	0.582	0.940
l_{65} (mm)	3.562	4.150	3.626	1.420	0.911	0.950
$ m_{75} $ (kN/mm)	2.420	2.522	2.905	220.822	16.518	431.575
CT_{index}	78.8	87.3	62.0	0.3	2.0	0.1
IDT strenght (kPa)	1003	864	885	5341	5322	4216

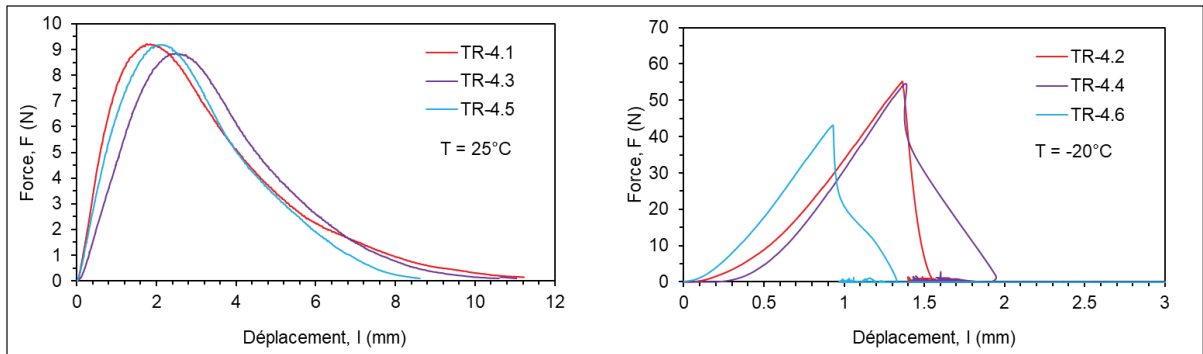
Figure A VII.44 Résultats IDT et CT_{index} TR-4

Tableau A VII.116 Résultats IDT et CT_{index} HB-1

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	HB-1.1	HB-1.3	HB-1.6	HB-1.2	HB-1.4	HB-1.5
Work of failure (J)	32.1	32.1	29.9	28.4	29.8	27.9
Failure energy (J/m^2)	5123	5112	4784	4515	4619	4384
P_{max} (kN)	7.32	7.32	8.01	46.78	45.70	47.28
P_{85} (kN)	6.22	6.22	6.80	39.76	38.85	40.19
P_{75} (kN)	5.49	5.49	6.00	35.08	34.28	35.46
P_{65} (kN)	4.76	4.76	5.20	30.40	29.71	30.73
l_{85} (mm)	2.935	2.935	2.663	1.215	1.228	1.212
l_{75} (mm)	3.312	3.312	2.991	1.250	1.255	1.245
l_{65} (mm)	3.785	3.785	3.352	1.283	1.280	1.284
$ m_{75} $ (kN/mm)	1.722	1.722	2.322	137.575	175.774	131.342
CT_{index}	96.3	96.5	60.0	0.4	0.3	0.4
IDT strenght (kPa)	743	742	816	4741	4506	4724

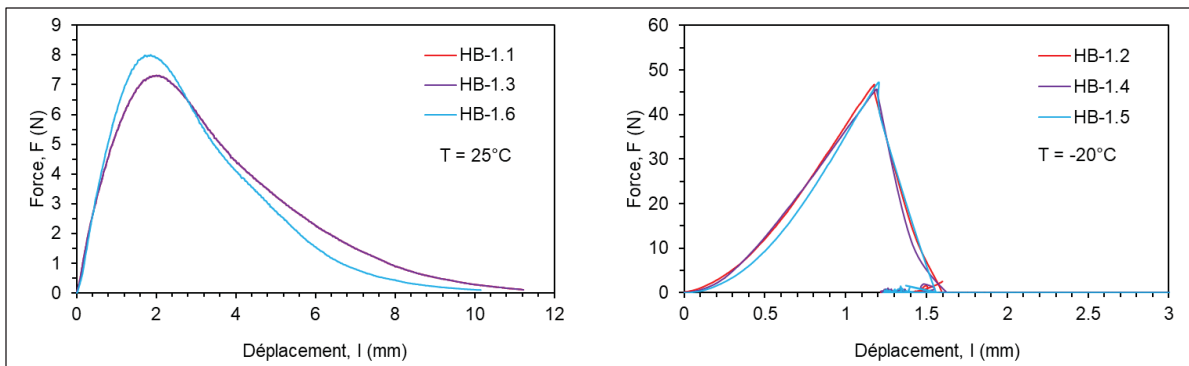
Figure A VII.45 Résultats IDT et CT_{index} HB-1

Tableau A VII.117 Résultats IDT et CT_{index} HB-2

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	HB-2.1	HB-2.3	HB-2.6	HB-2.2	HB-2.4	HB-2.5
Work of failure (J)	32.9	32.8	33.0	33.1	29.2	24.8
Failure energy (J/m^2)	5305	4983	5282	5352	4433	3937
P_{max} (kN)	8.04	8.48	7.96	52.94	46.34	49.38
P_{85} (kN)	6.83	7.20	6.77	45.00	39.39	41.97
P_{75} (kN)	6.03	6.36	5.97	39.70	34.75	37.03
P_{65} (kN)	5.23	5.51	5.18	34.41	30.12	32.09
l_{85} (mm)	2.900	2.794	2.898	1.248	1.116	1.202
l_{75} (mm)	3.236	3.112	3.270	1.260	1.145	1.227
l_{65} (mm)	3.626	3.471	3.636	1.269	1.146	1.257
$ m_{75} $ (kN/mm)	2.215	2.505	2.156	504.185	308.932	179.547
CT_{index}	75.7	63.5	78.2	0.1	0.2	0.3
IDT strenght (kPa)	824	820	812	5441	4476	4981

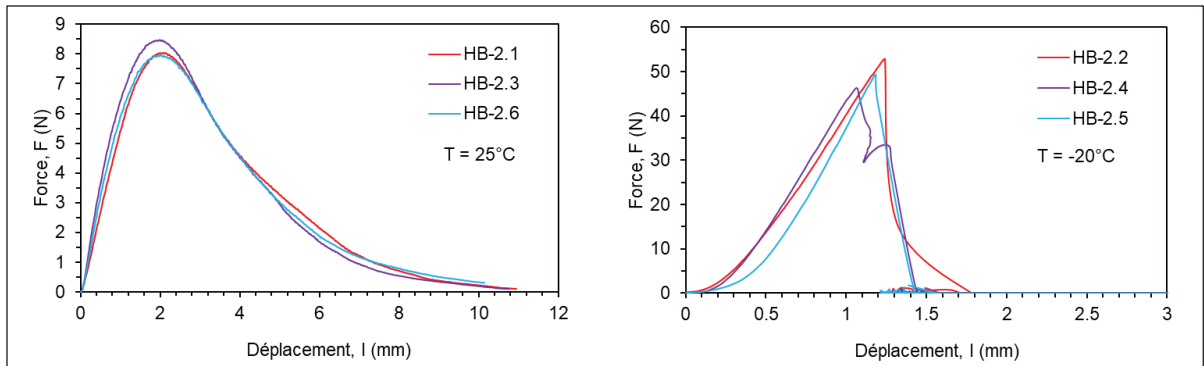
Figure A VII.46 Résultats IDT et CT_{index} HB-2

Tableau A VII.118 Résultats IDT et CT_{index} HB-3

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	HB-3.1	HB-3.3	HB-3.5	HB-3.2	HB-3.4	HB-3.6
Work of failure (J)	30.7	35.4	30.2	39.8	28.8	25.8
Failure energy (J/m^2)	4983	5631	4978	6461	4585	4198
P_{max} (kN)	8.25	7.86	8.43	59.35	51.11	46.01
P_{85} (kN)	7.02	6.68	7.16	50.44	43.44	39.11
P_{75} (kN)	6.19	5.90	6.32	44.51	38.33	34.51
P_{65} (kN)	5.37	5.11	5.48	38.57	33.22	29.91
l_{85} (mm)	2.588	3.210	2.727	1.280	1.277	1.067
l_{75} (mm)	2.887	3.620	3.053	1.297	1.295	1.093
l_{65} (mm)	3.226	4.100	3.448	1.305	1.326	1.118
$ m_{75} $ (kN/mm)	2.588	1.767	2.339	474.765	208.604	180.435
CT_{index}	53.4	113.7	61.6	0.2	0.3	0.2
IDT strenght (kPa)	854	796	883	6127	5171	4775

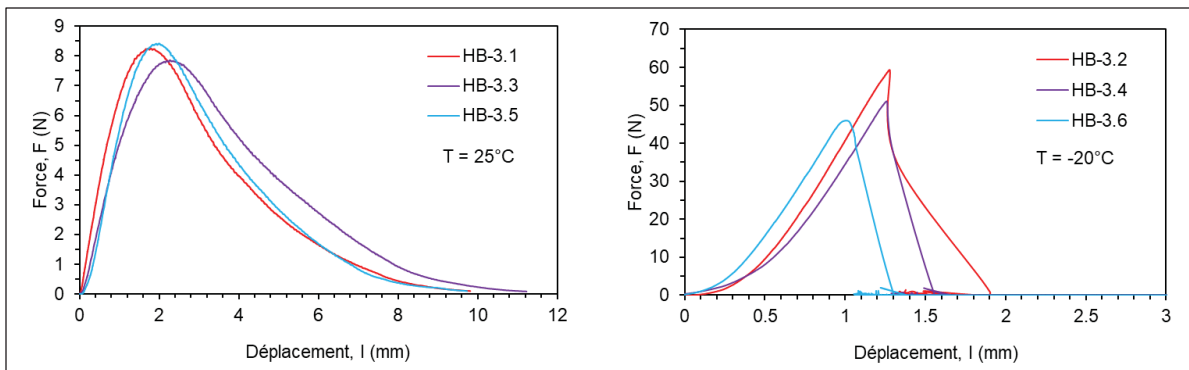
Figure A VII.47 Résultats IDT et CT_{index} HB-3

Tableau A VII.119 Résultats IDT et CT_{index} HB-4

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	HB-4.1	HB-4.4	HB-4.5	HB-4.3	HB-4.2	HB-4.6
Work of failure (J)	27.5	29.7	34.8	18.9	24.9	30.8
Failure energy (J/m^2)	4706	4777	5533	3002	3981	4961
P_{max} (kN)	6.42	7.23	7.34	37.56	44.44	51.32
P_{85} (kN)	5.46	6.14	6.23	31.93	37.77	43.62
P_{75} (kN)	4.81	5.42	5.50	28.17	33.33	38.49
P_{65} (kN)	4.17	4.70	4.77	24.42	28.89	33.36
l_{85} (mm)	3.218	3.471	3.174	1.105	1.173	1.241
l_{75} (mm)	3.605	3.817	3.582	1.120	1.186	1.252
l_{65} (mm)	4.016	4.192	4.006	1.135	1.216	1.296
$ m_{75} $ (kN/mm)	1.608	2.006	1.764	250.415	218.515	186.615
CT_{index}	96.4	88.5	111.0	0.1	0.2	0.3
IDT strenght (kPa)	699	741	742	3793	4526	5258

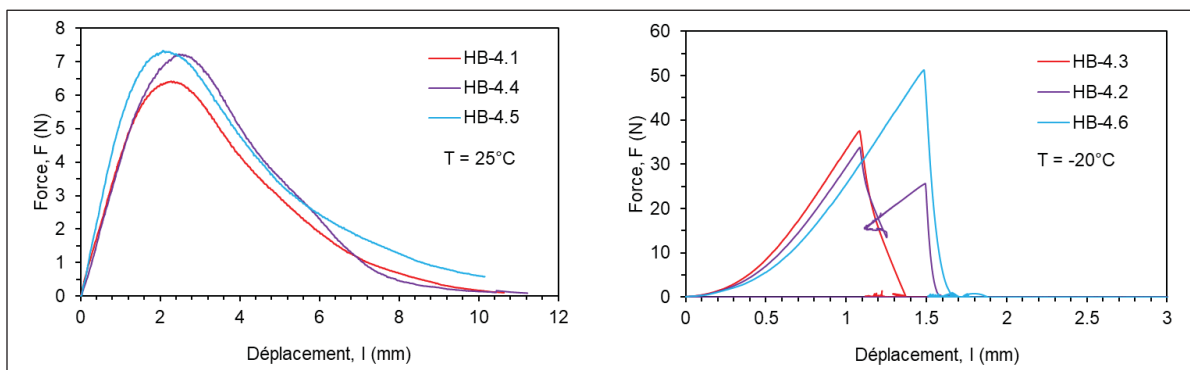
Figure A VII.48 Résultats IDT et CT_{index} HB-4

Tableau A VII.120 Résultats IDT et CT_{index} PM-1

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	PM-1.1	PM-1.3	PM-1.5	PM-1.2	PM-1.4	PM-1.6
Work of failure (J)	28.4	26.9	28.4	25.8	28.0	25.7
Failure energy (J/m^2)	4371	4271	4519	4015	4273	3986
P_{max} (kN)	6.95	7.04	7.32	50.67	47.93	39.84
P_{85} (kN)	5.91	5.99	6.22	43.07	40.74	33.86
P_{75} (kN)	5.21	5.28	5.49	38.00	35.95	29.88
P_{65} (kN)	4.52	4.58	4.76	32.94	31.16	25.89
l_{85} (mm)	3.048	2.725	2.645	1.232	1.232	1.433
l_{75} (mm)	3.373	3.061	2.962	1.244	1.244	1.449
l_{65} (mm)	3.727	3.396	3.350	1.255	1.255	1.470
$ m_{75} $ (kN/mm)	2.047	2.098	2.075	440.631	416.812	215.334
CT_{index}	73.1	61.3	63.5	0.1	0.1	0.3
IDT strenght (kPa)	682	713	740	5014	4656	3929

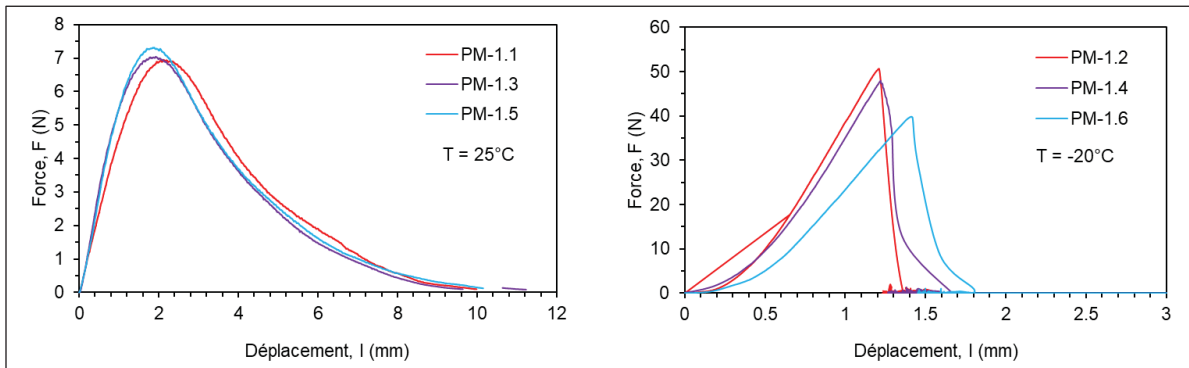
Figure A VII.49 Résultats IDT et CT_{index} PM-1

Tableau A VII.121 Résultats IDT et CT_{index} PM-2

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	PM-2.2	PM-2.4	PM-2.6	PM-2.1	PM-2.3	PM-2.5
Work of failure (J)	32.7	30.5	32.5	26.6	27.7	25.9
Failure energy (J/m^2)	5148	4798	4879	4272	4286	4123
P_{max} (kN)	7.77	7.84	8.23	46.78	47.23	51.85
P_{85} (kN)	6.60	6.67	7.00	39.77	40.15	44.07
P_{75} (kN)	5.83	5.88	6.17	35.09	35.43	38.88
P_{65} (kN)	5.05	5.10	5.35	30.41	30.70	33.70
l_{85} (mm)	3.223	2.727	3.146	1.100	1.381	1.053
l_{75} (mm)	3.567	3.050	3.505	1.126	1.390	1.066
l_{65} (mm)	3.946	3.381	3.835	1.163	1.400	1.073
$ m_{75} $ (kN/mm)	2.148	2.401	2.387	148.516	497.206	518.455
CT_{index}	84.9	60.6	74.7	0.3	0.3	0.1
IDT strenght (kPa)	778	786	786	4784	4653	5255

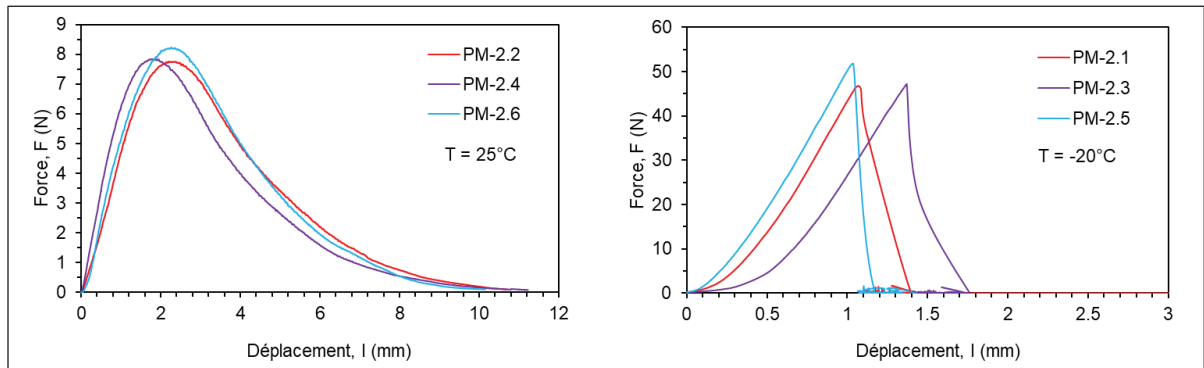
Figure A VII.50 Résultats IDT et CT_{index} PM-2

Tableau A VII.122 Résultats IDT et CT_{index} PM-3

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	PM-3.3	PM-3.4	PM-3.5	PM-3.2	PM-3.4	PM-3.6
Work of failure (J)	34.5	32.5	30.6	26.2	34.1	32.3
Failure energy (J/m ²)	5274	5025.4	4776	4057	5270	5108
P _{max} (kN)	8.38	8.25	8.12	46.83	54.00	41.82
P ₈₅ (kN)	7.12	7.01	6.90	39.81	45.90	35.54
P ₇₅ (kN)	6.29	6.19	6.09	35.12	40.50	31.36
P ₆₅ (kN)	5.45	5.36	5.28	30.44	35.10	27.18
l ₈₅ (mm)	2.903	2.853	2.803	1.070	1.170	1.119
l ₇₅ (mm)	3.267	3.186	3.105	1.085	1.210	1.138
l ₆₅ (mm)	3.629	3.519	3.410	1.102	1.220	1.157
m ₇₅ (kN/mm)	2.309	2.492	2.674	292.691	216.018	223.015
CT _{index}	76.2	65.7	55.3	0.2	0.3	0.3
IDT strenght (kPa)	816	812	807	4611	5307	4207

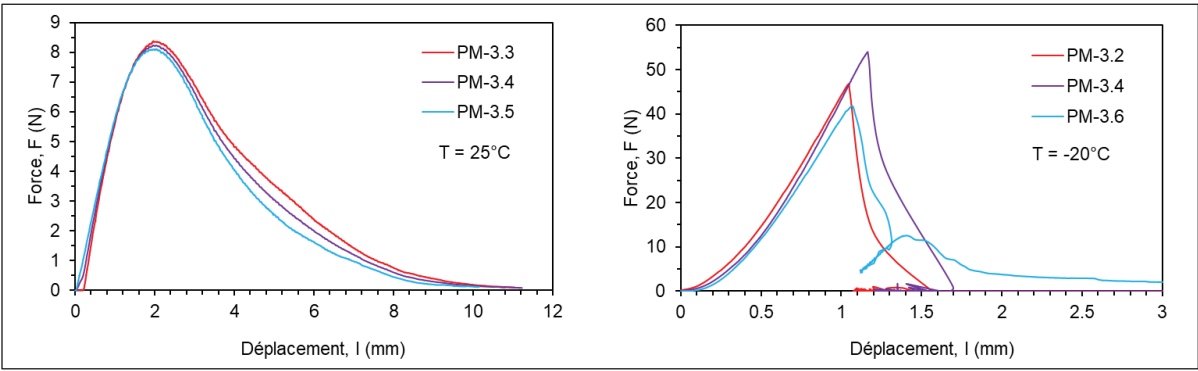


Figure A VII.51 Résultats IDT et CT_{index} PM-3

Tableau A VII.123 Résultats IDT et CT_{index} PM-4

Temperature	25 °C			-20 °C		
ID	PM-4.1	PM-4.4	PM-4.6	PM-4.2	PM-4.3	PM-4.5
Work of failure (J)	32.7	29.5	33.8	20.9	30.1	30.5
Failure energy (J/m^2)	5169	4586	5336	3237	4721	4815
P_{max} (kN)	7.84	8.09	8.69	37.91	48.93	53.93
P_{85} (kN)	6.66	6.87	7.39	32.23	41.59	45.84
P_{75} (kN)	5.88	6.06	6.52	28.44	36.70	40.45
P_{65} (kN)	5.09	5.26	5.65	24.64	31.81	35.06
l_{85} (mm)	3.081	2.962	2.869	1.110	1.070	1.130
l_{75} (mm)	3.427	3.262	3.177	1.130	1.100	1.145
l_{65} (mm)	3.766	3.541	3.487	1.150	1.120	1.162
$ m_{75} $ (kN/mm)	2.290	2.795	2.817	189.573	195.735	337.074
CT_{index}	76.6	53.9	59.5	0.2	0.3	0.2
IDT strenght (kPa)	789	800	875	3742	4894	5420

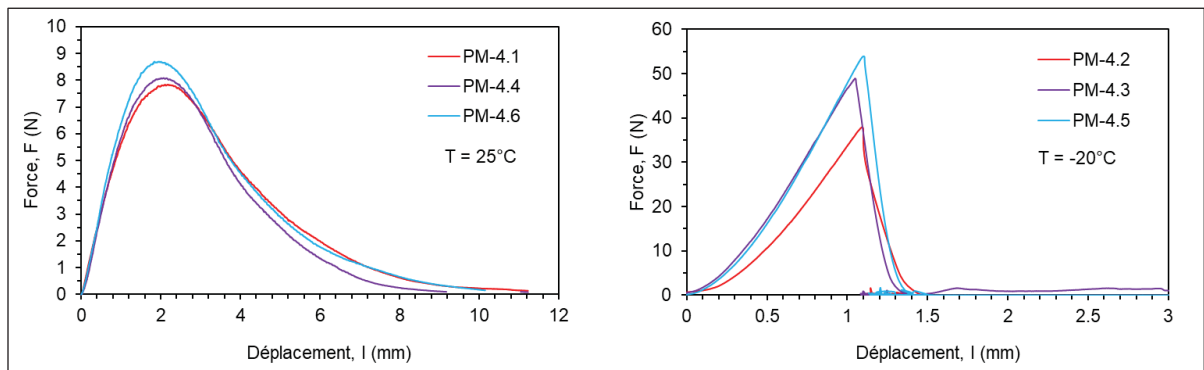
Figure A VII.52 Résultats IDT et CT_{index} PM-4

Tableau A VII.124 Résultats PCG ESG-10 TR-1

Masse PCG (g)	5125	densité maximale, dmm		2.524	hauteur mininale, h _{min} (mm)		114.9
Résultats							
N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)
1	151.6	51	127.1	101	123.7	151	122.0
2	148.2	52	127.0	102	123.7	152	122.0
3	145.8	53	126.9	103	123.6	153	122.0
4	144.0	54	126.8	104	123.6	154	122.0
5	142.5	55	126.7	105	123.5	155	121.9
6	141.2	56	126.6	106	123.5	156	121.9
7	140.1	57	126.5	107	123.4	157	121.9
8	139.2	58	126.4	108	123.4	158	121.9
9	138.4	59	126.3	109	123.4	159	121.8
10	137.6	60	126.3	110	123.3	160	121.8
11	137.0	61	126.2	111	123.3	161	121.8
12	136.3	62	126.1	112	123.3	162	121.8
13	135.8	63	126.0	113	123.2	163	121.7
14	135.3	64	125.9	114	123.2	164	121.7
15	134.8	65	125.8	115	123.1	165	121.7
16	134.3	66	125.8	116	123.1	166	121.7
17	133.9	67	125.7	117	123.1	167	121.6
18	133.5	68	125.6	118	123.0	168	121.6
19	133.2	69	125.5	119	123.0	169	121.6
20	132.8	70	125.5	120	123.0	170	121.6
21	132.5	71	125.4	121	122.9	171	121.6
22	132.2	72	125.3	122	122.9	172	121.5
23	131.9	73	125.3	123	122.9	173	121.5
24	131.6	74	125.2	124	122.8	174	121.5
25	131.4	75	125.1	125	122.8	175	121.5
26	131.1	76	125.1	126	122.8	176	121.4
27	130.9	77	125.0	127	122.7	177	121.4
28	130.7	78	124.9	128	122.7	178	121.4
29	130.4	79	124.9	129	122.7	179	121.4
30	130.2	80	124.8	130	122.6	180	121.4
31	130.0	81	124.7	131	122.6	181	121.4
32	129.8	82	124.7	132	122.6	182	121.3
33	129.7	83	124.6	133	122.5	183	121.3
34	129.5	84	124.6	134	122.5	184	121.3
35	129.3	85	124.5	135	122.5	185	121.3
36	129.1	86	124.5	136	122.4	186	121.3
37	129.0	87	124.4	137	122.4	187	121.2
38	128.8	88	124.3	138	122.4	188	121.2
39	128.7	89	124.3	139	122.4	189	121.2
40	128.5	90	124.2	140	122.3	190	121.2
41	128.4	91	124.2	141	122.3	191	121.2
42	128.2	92	124.1	142	122.3	192	121.1
43	128.1	93	124.1	143	122.2	193	121.1
44	128.0	94	124.0	144	122.2	194	121.1
45	127.8	95	124.0	145	122.2	195	121.1
46	127.7	96	123.9	146	122.2	196	121.1
47	127.6	97	123.9	147	122.1	197	121.0
48	127.5	98	123.8	148	122.1	198	121.0
49	127.4	99	123.8	149	122.1	199	121.0
50	127.2	100	123.8	150	122.1	200	121.0

Tableau A VII.125 Résultats PCG ESG-10 TR-2

Masse PCG (g)	5121	densité maximale, dmm		2.514	hauteur mininale, h _{min} (mm)		115.3
Résultats							
N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)
1	149.8	51	125.4	101	121.9	151	120.3
2	146.4	52	125.3	102	121.9	152	120.3
3	144.0	53	125.1	103	121.9	153	120.3
4	142.2	54	125.0	104	121.8	154	120.2
5	140.7	55	124.9	105	121.8	155	120.2
6	139.5	56	124.8	106	121.7	156	120.2
7	138.4	57	124.7	107	121.7	157	120.2
8	137.5	58	124.6	108	121.6	158	120.2
9	136.7	59	124.6	109	121.6	159	120.1
10	135.9	60	124.5	110	121.6	160	120.1
11	135.3	61	124.4	111	121.5	161	120.1
12	134.7	62	124.3	112	121.5	162	120.1
13	134.1	63	124.2	113	121.5	163	120.0
14	133.6	64	124.1	114	121.4	164	120.0
15	133.1	65	124.0	115	121.4	165	120.0
16	132.7	66	124.0	116	121.3	166	120.0
17	132.2	67	123.9	117	121.3	167	119.9
18	131.9	68	123.8	118	121.3	168	119.9
19	131.5	69	123.7	119	121.2	169	119.9
20	131.2	70	123.7	120	121.2	170	119.9
21	130.8	71	123.6	121	121.2	171	119.9
22	130.5	72	123.5	122	121.1	172	119.8
23	130.2	73	123.5	123	121.1	173	119.8
24	130.0	74	123.4	124	121.1	174	119.8
25	129.7	75	123.3	125	121.0	175	119.8
26	129.4	76	123.3	126	121.0	176	119.8
27	129.2	77	123.2	127	121.0	177	119.8
28	129.0	78	123.1	128	120.9	178	119.7
29	128.7	79	123.1	129	120.9	179	119.7
30	128.5	80	123.0	130	120.9	180	119.7
31	128.3	81	123.0	131	120.9	181	119.7
32	128.1	82	122.9	132	120.8	182	119.7
33	127.9	83	122.8	133	120.8	183	119.6
34	127.8	84	122.8	134	120.8	184	119.6
35	127.6	85	122.7	135	120.7	185	119.6
36	127.4	86	122.7	136	120.7	186	119.6
37	127.2	87	122.6	137	120.7	187	119.6
38	127.1	88	122.6	138	120.7	188	119.6
39	126.9	89	122.5	139	120.6	189	119.5
40	126.8	90	122.5	140	120.6	190	119.5
41	126.6	91	122.4	141	120.6	191	119.5
42	126.5	92	122.4	142	120.5	192	119.5
43	126.3	93	122.3	143	120.5	193	119.5
44	126.2	94	122.3	144	120.5	194	119.4
45	126.1	95	122.2	145	120.5	195	119.4
46	125.9	96	122.2	146	120.4	196	119.4
47	125.8	97	122.1	147	120.4	197	119.4
48	125.7	98	122.1	148	120.4	198	119.4
49	125.6	99	122.0	149	120.4	199	119.4
50	125.5	100	122.0	150	120.3	200	119.4

Tableau A VII.126 Résultats PCG ESG-10 TR-3

Masse PCG (g)	5087	densité maximale, dmm		2.519	hauteur mininale, h _{min} (mm)		114.3
Résultats							
N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)
1	148.9	51	124.9	101	121.5	151	119.9
2	145.7	52	124.8	102	121.5	152	119.8
3	143.4	53	124.7	103	121.4	153	119.8
4	141.6	54	124.6	104	121.4	154	119.8
5	140.1	55	124.5	105	121.3	155	119.8
6	138.9	56	124.4	106	121.3	156	119.7
7	137.8	57	124.3	107	121.2	157	119.7
8	136.9	58	124.2	108	121.2	158	119.7
9	136.0	59	124.1	109	121.2	159	119.7
10	135.3	60	124.0	110	121.1	160	119.7
11	134.6	61	123.9	111	121.1	161	119.6
12	134.0	62	123.9	112	121.1	162	119.6
13	133.5	63	123.8	113	121.0	163	119.6
14	133.0	64	123.7	114	121.0	164	119.6
15	132.5	65	123.6	115	120.9	165	119.5
16	132.1	66	123.5	116	120.9	166	119.5
17	131.7	67	123.4	117	120.9	167	119.5
18	131.3	68	123.4	118	120.8	168	119.5
19	130.9	69	123.3	119	120.8	169	119.5
20	130.6	70	123.2	120	120.8	170	119.4
21	130.3	71	123.2	121	120.7	171	119.4
22	130.0	72	123.1	122	120.7	172	119.4
23	129.7	73	123.0	123	120.7	173	119.4
24	129.4	74	123.0	124	120.6	174	119.4
25	129.1	75	122.9	125	120.6	175	119.3
26	128.9	76	122.8	126	120.6	176	119.3
27	128.7	77	122.8	127	120.5	177	119.3
28	128.4	78	122.7	128	120.5	178	119.3
29	128.2	79	122.6	129	120.5	179	119.3
30	128.0	80	122.6	130	120.4	180	119.2
31	127.8	81	122.5	131	120.4	181	119.2
32	127.6	82	122.5	132	120.4	182	119.2
33	127.4	83	122.4	133	120.4	183	119.2
34	127.2	84	122.3	134	120.3	184	119.2
35	127.0	85	122.3	135	120.3	185	119.1
36	126.9	86	122.2	136	120.3	186	119.1
37	126.7	87	122.2	137	120.2	187	119.1
38	126.6	88	122.1	138	120.2	188	119.1
39	126.4	89	122.1	139	120.2	189	119.1
40	126.3	90	122.0	140	120.2	190	119.0
41	126.1	91	122.0	141	120.1	191	119.0
42	126.0	92	121.9	142	120.1	192	119.0
43	125.8	93	121.9	143	120.1	193	119.0
44	125.7	94	121.8	144	120.0	194	119.0
45	125.6	95	121.8	145	120.0	195	119.0
46	125.5	96	121.7	146	120.0	196	118.9
47	125.3	97	121.7	147	120.0	197	118.9
48	125.2	98	121.6	148	119.9	198	118.9
49	125.1	99	121.6	149	119.9	199	118.9
50	125.0	100	121.5	150	119.9	200	118.9

Tableau A VII.127 Résultats PCG ESG-10 TR-4

Masse PCG (g)	5127	densité maximale, dmm		2.522	hauteur mininale, h _{min} (mm)		115.1
Résultats							
N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)
1	149.7	51	125.0	101	121.6	151	120.0
2	146.4	52	124.9	102	121.6	152	120.0
3	144.0	53	124.8	103	121.5	153	120.0
4	142.1	54	124.7	104	121.5	154	120.0
5	140.5	55	124.6	105	121.5	155	119.9
6	139.3	56	124.5	106	121.4	156	119.9
7	138.2	57	124.4	107	121.4	157	119.9
8	137.2	58	124.3	108	121.3	158	119.9
9	136.4	59	124.2	109	121.3	159	119.8
10	135.6	60	124.1	110	121.3	160	119.8
11	134.9	61	124.0	111	121.2	161	119.8
12	134.3	62	123.9	112	121.2	162	119.8
13	133.7	63	123.9	113	121.1	163	119.8
14	133.2	64	123.8	114	121.1	164	119.7
15	132.7	65	123.7	115	121.1	165	119.7
16	132.3	66	123.6	116	121.0	166	119.7
17	131.8	67	123.5	117	121.0	167	119.7
18	131.5	68	123.5	118	121.0	168	119.6
19	131.1	69	123.4	119	120.9	169	119.6
20	130.7	70	123.3	120	120.9	170	119.6
21	130.4	71	123.3	121	120.9	171	119.6
22	130.1	72	123.2	122	120.8	172	119.6
23	129.8	73	123.1	123	120.8	173	119.5
24	129.5	74	123.0	124	120.8	174	119.5
25	129.3	75	123.0	125	120.7	175	119.5
26	129.0	76	122.9	126	120.7	176	119.5
27	128.8	77	122.9	127	120.7	177	119.5
28	128.5	78	122.8	128	120.6	178	119.4
29	128.3	79	122.7	129	120.6	179	119.4
30	128.1	80	122.7	130	120.6	180	119.4
31	127.9	81	122.6	131	120.6	181	119.4
32	127.7	82	122.6	132	120.5	182	119.4
33	127.5	83	122.5	133	120.5	183	119.4
34	127.3	84	122.4	134	120.5	184	119.3
35	127.2	85	122.4	135	120.4	185	119.3
36	127.0	86	122.3	136	120.4	186	119.3
37	126.8	87	122.3	137	120.4	187	119.3
38	126.7	88	122.2	138	120.4	188	119.3
39	126.5	89	122.2	139	120.3	189	119.2
40	126.4	90	122.1	140	120.3	190	119.2
41	126.2	91	122.1	141	120.3	191	119.2
42	126.1	92	122.0	142	120.3	192	119.2
43	125.9	93	122.0	143	120.2	193	119.2
44	125.8	94	121.9	144	120.2	194	119.2
45	125.7	95	121.9	145	120.2	195	119.1
46	125.6	96	121.8	146	120.1	196	119.1
47	125.4	97	121.8	147	120.1	197	119.1
48	125.3	98	121.8	148	120.1	198	119.1
49	125.2	99	121.7	149	120.1	199	119.1
50	125.1	100	121.7	150	120.1	200	119.1

Tableau A VII.128 Résultats PCG ESG-10 HB-1

Masse PCG (g)	5119	densité maximale, dmm		2.526	hauteur mininale, h _{min} (mm)		114.7
Résultats							
N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)
1	147.6	51	123.9	101	120.7	151	119.1
2	144.4	52	123.8	102	120.6	152	119.1
3	142.0	53	123.7	103	120.6	153	119.0
4	140.2	54	123.6	104	120.5	154	119.0
5	138.8	55	123.5	105	120.5	155	119.0
6	137.6	56	123.4	106	120.5	156	119.0
7	136.5	57	123.3	107	120.4	157	119.0
8	135.6	58	123.3	108	120.4	158	118.9
9	134.8	59	123.2	109	120.3	159	118.9
10	134.1	60	123.1	110	120.3	160	118.9
11	133.5	61	123.0	111	120.3	161	118.9
12	132.9	62	122.9	112	120.2	162	118.8
13	132.3	63	122.8	113	120.2	163	118.8
14	131.8	64	122.7	114	120.2	164	118.8
15	131.4	65	122.7	115	120.1	165	118.8
16	130.9	66	122.6	116	120.1	166	118.8
17	130.6	67	122.5	117	120.1	167	118.7
18	130.2	68	122.5	118	120.0	168	118.7
19	129.8	69	122.4	119	120.0	169	118.7
20	129.5	70	122.3	120	120.0	170	118.7
21	129.2	71	122.2	121	119.9	171	118.7
22	128.9	72	122.2	122	119.9	172	118.6
23	128.6	73	122.1	123	119.9	173	118.6
24	128.3	74	122.0	124	119.8	174	118.6
25	128.1	75	122.0	125	119.8	175	118.6
26	127.8	76	121.9	126	119.8	176	118.6
27	127.6	77	121.9	127	119.7	177	118.6
28	127.4	78	121.8	128	119.7	178	118.5
29	127.2	79	121.7	129	119.7	179	118.5
30	127.0	80	121.7	130	119.6	180	118.5
31	126.8	81	121.6	131	119.6	181	118.5
32	126.6	82	121.6	132	119.6	182	118.5
33	126.4	83	121.5	133	119.6	183	118.4
34	126.2	84	121.5	134	119.5	184	118.4
35	126.0	85	121.4	135	119.5	185	118.4
36	125.9	86	121.3	136	119.5	186	118.4
37	125.7	87	121.3	137	119.4	187	118.4
38	125.6	88	121.2	138	119.4	188	118.4
39	125.4	89	121.2	139	119.4	189	118.3
40	125.3	90	121.1	140	119.4	190	118.3
41	125.1	91	121.1	141	119.3	191	118.3
42	125.0	92	121.0	142	119.3	192	118.3
43	124.9	93	121.0	143	119.3	193	118.3
44	124.7	94	121.0	144	119.3	194	118.3
45	124.6	95	120.9	145	119.2	195	118.2
46	124.5	96	120.9	146	119.2	196	118.2
47	124.4	97	120.8	147	119.2	197	118.2
48	124.3	98	120.8	148	119.2	198	118.2
49	124.1	99	120.7	149	119.1	199	118.2
50	124.0	100	120.7	150	119.1	200	118.2

Tableau A VII.129 Résultats PCG ESG-10 HB-2

Masse PCG (g)	5199	densité maximale, dmm		2.509	hauteur mininale, h _{min} (mm)		117.3
Résultats							
N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)
1	149.5	51	125.2	101	121.8	151	120.2
2	146.2	52	125.1	102	121.7	152	120.2
3	143.8	53	125.0	103	121.7	153	120.2
4	142.0	54	124.9	104	121.7	154	120.1
5	140.5	55	124.8	105	121.6	155	120.1
6	139.2	56	124.7	106	121.6	156	120.1
7	138.2	57	124.6	107	121.5	157	120.1
8	137.2	58	124.5	108	121.5	158	120.0
9	136.4	59	124.4	109	121.5	159	120.0
10	135.7	60	124.3	110	121.4	160	120.0
11	135.0	61	124.2	111	121.4	161	120.0
12	134.4	62	124.1	112	121.3	162	120.0
13	133.9	63	124.1	113	121.3	163	119.9
14	133.4	64	124.0	114	121.3	164	119.9
15	132.9	65	123.9	115	121.2	165	119.9
16	132.5	66	123.8	116	121.2	166	119.9
17	132.0	67	123.7	117	121.2	167	119.9
18	131.6	68	123.7	118	121.1	168	119.8
19	131.3	69	123.6	119	121.1	169	119.8
20	130.9	70	123.5	120	121.1	170	119.8
21	130.6	71	123.4	121	121.0	171	119.8
22	130.3	72	123.4	122	121.0	172	119.8
23	130.0	73	123.3	123	121.0	173	119.7
24	129.7	74	123.2	124	120.9	174	119.7
25	129.5	75	123.2	125	120.9	175	119.7
26	129.2	76	123.1	126	120.9	176	119.7
27	129.0	77	123.0	127	120.8	177	119.7
28	128.7	78	123.0	128	120.8	178	119.7
29	128.5	79	122.9	129	120.8	179	119.6
30	128.3	80	122.9	130	120.7	180	119.6
31	128.1	81	122.8	131	120.7	181	119.6
32	127.9	82	122.7	132	120.7	182	119.6
33	127.7	83	122.7	133	120.7	183	119.6
34	127.5	84	122.6	134	120.6	184	119.5
35	127.4	85	122.6	135	120.6	185	119.5
36	127.2	86	122.5	136	120.6	186	119.5
37	127.0	87	122.5	137	120.6	187	119.5
38	126.9	88	122.4	138	120.5	188	119.5
39	126.7	89	122.4	139	120.5	189	119.5
40	126.6	90	122.3	140	120.5	190	119.5
41	126.4	91	122.3	141	120.4	191	119.4
42	126.3	92	122.2	142	120.4	192	119.4
43	126.1	93	122.2	143	120.4	193	119.4
44	126.0	94	122.1	144	120.4	194	119.4
45	125.9	95	122.1	145	120.3	195	119.4
46	125.7	96	122.0	146	120.3	196	119.4
47	125.6	97	122.0	147	120.3	197	119.3
48	125.5	98	121.9	148	120.3	198	119.3
49	125.4	99	121.9	149	120.2	199	119.3
50	125.3	100	121.8	150	120.2	200	119.3

Tableau A VII.130 Résultats PCG ESG-10 HB-3

Masse PCG (g)	5236	densité maximale, dmm		2.518	hauteur mininale, h _{min} (mm)		117.7
Résultats							
N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)
1	150.1	51	125.5	101	122.1	151	120.6
2	146.8	52	125.4	102	122.1	152	120.6
3	144.4	53	125.3	103	122.1	153	120.6
4	142.5	54	125.2	104	122.0	154	120.6
5	141.0	55	125.1	105	122.0	155	120.5
6	139.8	56	125.0	106	121.9	156	120.5
7	138.7	57	124.9	107	121.9	157	120.5
8	137.7	58	124.8	108	121.9	158	120.5
9	136.9	59	124.7	109	121.8	159	120.5
10	136.1	60	124.6	110	121.8	160	120.4
11	135.5	61	124.5	111	121.8	161	120.4
12	134.9	62	124.4	112	121.7	162	120.4
13	134.3	63	124.3	113	121.7	163	120.4
14	133.8	64	124.3	114	121.6	164	120.4
15	133.3	65	124.2	115	121.6	165	120.3
16	132.9	66	124.1	116	121.6	166	120.3
17	132.4	67	124.0	117	121.5	167	120.3
18	132.1	68	124.0	118	121.5	168	120.3
19	131.7	69	123.9	119	121.5	169	120.3
20	131.3	70	123.8	120	121.4	170	120.3
21	131.0	71	123.8	121	121.4	171	120.2
22	130.7	72	123.7	122	121.4	172	120.2
23	130.4	73	123.6	123	121.4	173	120.2
24	130.1	74	123.5	124	121.3	174	120.2
25	129.9	75	123.5	125	121.3	175	120.2
26	129.6	76	123.4	126	121.3	176	120.1
27	129.4	77	123.4	127	121.2	177	120.1
28	129.1	78	123.3	128	121.2	178	120.1
29	128.9	79	123.2	129	121.2	179	120.1
30	128.7	80	123.2	130	121.1	180	120.1
31	128.5	81	123.1	131	121.1	181	120.1
32	128.3	82	123.1	132	121.1	182	120.0
33	128.1	83	123.0	133	121.1	183	120.0
34	127.9	84	123.0	134	121.0	184	120.0
35	127.7	85	122.9	135	121.0	185	120.0
36	127.5	86	122.8	136	121.0	186	120.0
37	127.4	87	122.8	137	121.0	187	120.0
38	127.2	88	122.7	138	120.9	188	120.0
39	127.0	89	122.7	139	120.9	189	119.9
40	126.9	90	122.6	140	120.9	190	119.9
41	126.7	91	122.6	141	120.9	191	119.9
42	126.6	92	122.5	142	120.8	192	119.9
43	126.5	93	122.5	143	120.8	193	119.9
44	126.3	94	122.4	144	120.8	194	119.9
45	126.2	95	122.4	145	120.8	195	119.8
46	126.1	96	122.4	146	120.7	196	119.8
47	125.9	97	122.3	147	120.7	197	119.8
48	125.8	98	122.3	148	120.7	198	119.8
49	125.7	99	122.2	149	120.7	199	119.8
50	125.6	100	122.2	150	120.7	200	119.8

Tableau A VII.131 Résultats PCG ESG-10 HB-4

Masse PCG (g)	5144	densité maximale, dmm		2.514	hauteur mininale, h _{min} (mm)		115.8
Résultats							
N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)
1	145.7	51	122.0	101	119.0	151	117.8
2	142.5	52	121.9	102	118.9	152	117.8
3	140.2	53	121.8	103	118.9	153	117.8
4	138.4	54	121.7	104	118.9	154	117.8
5	136.9	55	121.6	105	118.8	155	117.7
6	135.7	56	121.6	106	118.8	156	117.7
7	134.6	57	121.5	107	118.8	157	117.7
8	133.7	58	121.4	108	118.8	158	117.7
9	132.9	59	121.3	109	118.7	159	117.7
10	132.2	60	121.2	110	118.7	160	117.7
11	131.5	61	121.1	111	118.7	161	117.7
12	130.9	62	121.1	112	118.6	162	117.6
13	130.4	63	121.0	113	118.6	163	117.6
14	129.9	64	120.9	114	118.6	164	117.6
15	129.5	65	120.8	115	118.5	165	117.6
16	129.0	66	120.8	116	118.5	166	117.6
17	128.6	67	120.7	117	118.5	167	117.6
18	128.3	68	120.6	118	118.5	168	117.6
19	127.9	69	120.5	119	118.4	169	117.5
20	127.6	70	120.5	120	118.4	170	117.5
21	127.3	71	120.4	121	118.4	171	117.5
22	127.0	72	120.4	122	118.4	172	117.5
23	126.7	73	120.3	123	118.3	173	117.5
24	126.4	74	120.2	124	118.3	174	117.5
25	126.2	75	120.2	125	118.3	175	117.5
26	125.9	76	120.1	126	118.3	176	117.5
27	125.7	77	120.1	127	118.3	177	117.5
28	125.5	78	120.0	128	118.2	178	117.4
29	125.2	79	119.9	129	118.2	179	117.4
30	125.0	80	119.9	130	118.2	180	117.4
31	124.8	81	119.8	131	118.2	181	117.4
32	124.6	82	119.8	132	118.1	182	117.4
33	124.5	83	119.7	133	118.1	183	117.4
34	124.3	84	119.7	134	118.1	184	117.4
35	124.1	85	119.6	135	118.1	185	117.4
36	124.0	86	119.6	136	118.1	186	117.4
37	123.8	87	119.5	137	118.0	187	117.4
38	123.6	88	119.5	138	118.0	188	117.3
39	123.5	89	119.5	139	118.0	189	117.3
40	123.4	90	119.4	140	118.0	190	117.3
41	123.2	91	119.4	141	118.0	191	117.3
42	123.1	92	119.3	142	118.0	192	117.3
43	122.9	93	119.3	143	117.9	193	117.3
44	122.8	94	119.2	144	117.9	194	117.3
45	122.7	95	119.2	145	117.9	195	117.3
46	122.6	96	119.2	146	117.9	196	117.3
47	122.5	97	119.1	147	117.9	197	117.3
48	122.4	98	119.1	148	117.8	198	117.3
49	122.2	99	119.1	149	117.8	199	117.3
50	122.1	100	119.0	150	117.8	200	117.2

Tableau A VII.132 Résultats PCG ESG-10 PM-1

Masse PCG (g)	5130	densité maximale, dmm		2.530	hauteur mininale, h _{min} (mm)		114.8
Résultats							
N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)
1	153.1	51	128.7	101	125.3	151	123.6
2	149.8	52	128.6	102	125.2	152	123.6
3	147.4	53	128.5	103	125.2	153	123.5
4	145.6	54	128.4	104	125.1	154	123.5
5	144.1	55	128.3	105	125.1	155	123.5
6	142.8	56	128.2	106	125.1	156	123.5
7	141.7	57	128.1	107	125.0	157	123.4
8	140.8	58	128.0	108	125.0	158	123.4
9	140.0	59	127.9	109	124.9	159	123.4
10	139.2	60	127.8	110	124.9	160	123.4
11	138.6	61	127.7	111	124.9	161	123.3
12	137.9	62	127.6	112	124.8	162	123.3
13	137.4	63	127.6	113	124.8	163	123.3
14	136.9	64	127.5	114	124.7	164	123.3
15	136.4	65	127.4	115	124.7	165	123.3
16	136.0	66	127.3	116	124.7	166	123.2
17	135.5	67	127.2	117	124.6	167	123.2
18	135.2	68	127.2	118	124.6	168	123.2
19	134.8	69	127.1	119	124.6	169	123.2
20	134.5	70	127.0	120	124.5	170	123.1
21	134.1	71	126.9	121	124.5	171	123.1
22	133.8	72	126.9	122	124.5	172	123.1
23	133.5	73	126.8	123	124.4	173	123.1
24	133.3	74	126.7	124	124.4	174	123.0
25	133.0	75	126.7	125	124.4	175	123.0
26	132.7	76	126.6	126	124.3	176	123.0
27	132.5	77	126.5	127	124.3	177	123.0
28	132.3	78	126.5	128	124.3	178	123.0
29	132.0	79	126.4	129	124.2	179	122.9
30	131.8	80	126.3	130	124.2	180	122.9
31	131.6	81	126.3	131	124.2	181	122.9
32	131.4	82	126.2	132	124.1	182	122.9
33	131.2	83	126.2	133	124.1	183	122.9
34	131.1	84	126.1	134	124.1	184	122.8
35	130.9	85	126.1	135	124.0	185	122.8
36	130.7	86	126.0	136	124.0	186	122.8
37	130.5	87	125.9	137	124.0	187	122.8
38	130.4	88	125.9	138	124.0	188	122.8
39	130.2	89	125.8	139	123.9	189	122.7
40	130.1	90	125.8	140	123.9	190	122.7
41	129.9	91	125.7	141	123.9	191	122.7
42	129.8	92	125.7	142	123.8	192	122.7
43	129.7	93	125.6	143	123.8	193	122.7
44	129.5	94	125.6	144	123.8	194	122.6
45	129.4	95	125.5	145	123.8	195	122.6
46	129.3	96	125.5	146	123.7	196	122.6
47	129.2	97	125.5	147	123.7	197	122.6
48	129.0	98	125.4	148	123.7	198	122.6
49	128.9	99	125.4	149	123.6	199	122.6
50	128.8	100	125.3	150	123.6	200	122.5

Tableau A VII.133 Résultats PCG ESG-10 PM-2

Masse PCG (g)	5130	densité maximale, dmm		2.525	hauteur mininale, h _{min} (mm)		115.0
Résultats							
N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)
1	150.5	51	125.7	101	122.4	151	120.7
2	147.1	52	125.6	102	122.3	152	120.7
3	144.6	53	125.5	103	122.3	153	120.7
4	142.7	54	125.4	104	122.2	154	120.6
5	141.2	55	125.3	105	122.2	155	120.6
6	139.9	56	125.2	106	122.1	156	120.6
7	138.8	57	125.1	107	122.1	157	120.6
8	137.9	58	125.1	108	122.1	158	120.5
9	137.0	59	125.0	109	122.0	159	120.5
10	136.3	60	124.9	110	122.0	160	120.5
11	135.6	61	124.8	111	121.9	161	120.5
12	135.0	62	124.7	112	121.9	162	120.4
13	134.4	63	124.6	113	121.9	163	120.4
14	133.9	64	124.5	114	121.8	164	120.4
15	133.4	65	124.5	115	121.8	165	120.4
16	133.0	66	124.4	116	121.8	166	120.4
17	132.6	67	124.3	117	121.7	167	120.3
18	132.2	68	124.2	118	121.7	168	120.3
19	131.8	69	124.2	119	121.6	169	120.3
20	131.5	70	124.1	120	121.6	170	120.3
21	131.1	71	124.0	121	121.6	171	120.2
22	130.8	72	124.0	122	121.5	172	120.2
23	130.5	73	123.9	123	121.5	173	120.2
24	130.3	74	123.8	124	121.5	174	120.2
25	130.0	75	123.7	125	121.4	175	120.2
26	129.8	76	123.7	126	121.4	176	120.1
27	129.5	77	123.6	127	121.4	177	120.1
28	129.3	78	123.6	128	121.3	178	120.1
29	129.1	79	123.5	129	121.3	179	120.1
30	128.9	80	123.4	130	121.3	180	120.1
31	128.7	81	123.4	131	121.3	181	120.0
32	128.5	82	123.3	132	121.2	182	120.0
33	128.3	83	123.3	133	121.2	183	120.0
34	128.1	84	123.2	134	121.2	184	120.0
35	127.9	85	123.1	135	121.1	185	120.0
36	127.7	86	123.1	136	121.1	186	120.0
37	127.6	87	123.0	137	121.1	187	119.9
38	127.4	88	123.0	138	121.0	188	119.9
39	127.3	89	122.9	139	121.0	189	119.9
40	127.1	90	122.9	140	121.0	190	119.9
41	127.0	91	122.8	141	121.0	191	119.9
42	126.8	92	122.8	142	120.9	192	119.8
43	126.7	93	122.7	143	120.9	193	119.8
44	126.6	94	122.7	144	120.9	194	119.8
45	126.4	95	122.6	145	120.9	195	119.8
46	126.3	96	122.6	146	120.8	196	119.8
47	126.2	97	122.5	147	120.8	197	119.8
48	126.1	98	122.5	148	120.8	198	119.7
49	126.0	99	122.4	149	120.7	199	119.7
50	125.9	100	122.4	150	120.7	200	119.7

Tableau A VII.134 Résultats PCG ESG-10 PM-3

Masse PCG (g)	5129	densité maximale, dmm		2.521	hauteur mininale, hmin(mm)		115.2
Résultats							
N _g irations	hauteur. h (mm)	N _g irations	hauteur. h (mm)	N _g irations	hauteur. h (mm)	N _g irations	hauteur. h (mm)
1	150.0	51	125.9	101	122.5	151	120.9
2	146.7	52	125.8	102	122.5	152	120.9
3	144.3	53	125.7	103	122.4	153	120.8
4	142.5	54	125.6	104	122.4	154	120.8
5	141.0	55	125.5	105	122.3	155	120.8
6	139.8	56	125.4	106	122.3	156	120.8
7	138.7	57	125.3	107	122.3	157	120.7
8	137.8	58	125.2	108	122.2	158	120.7
9	137.0	59	125.1	109	122.2	159	120.7
10	136.3	60	125.0	110	122.1	160	120.7
11	135.6	61	124.9	111	122.1	161	120.7
12	135.0	62	124.9	112	122.1	162	120.6
13	134.5	63	124.8	113	122.0	163	120.6
14	134.0	64	124.7	114	122.0	164	120.6
15	133.5	65	124.6	115	122.0	165	120.6
16	133.1	66	124.5	116	121.9	166	120.5
17	132.7	67	124.5	117	121.9	167	120.5
18	132.3	68	124.4	118	121.9	168	120.5
19	131.9	69	124.3	119	121.8	169	120.5
20	131.6	70	124.2	120	121.8	170	120.5
21	131.3	71	124.2	121	121.8	171	120.4
22	131.0	72	124.1	122	121.7	172	120.4
23	130.7	73	124.0	123	121.7	173	120.4
24	130.4	74	124.0	124	121.7	174	120.4
25	130.1	75	123.9	125	121.6	175	120.4
26	129.9	76	123.8	126	121.6	176	120.3
27	129.6	77	123.8	127	121.6	177	120.3
28	129.4	78	123.7	128	121.5	178	120.3
29	129.2	79	123.6	129	121.5	179	120.3
30	129.0	80	123.6	130	121.5	180	120.3
31	128.8	81	123.5	131	121.4	181	120.2
32	128.6	82	123.5	132	121.4	182	120.2
33	128.4	83	123.4	133	121.4	183	120.2
34	128.2	84	123.4	134	121.3	184	120.2
35	128.0	85	123.3	135	121.3	185	120.2
36	127.9	86	123.2	136	121.3	186	120.2
37	127.7	87	123.2	137	121.3	187	120.1
38	127.6	88	123.1	138	121.2	188	120.1
39	127.4	89	123.1	139	121.2	189	120.1
40	127.3	90	123.0	140	121.2	190	120.1
41	127.1	91	123.0	141	121.1	191	120.1
42	127.0	92	122.9	142	121.1	192	120.0
43	126.8	93	122.9	143	121.1	193	120.0
44	126.7	94	122.8	144	121.1	194	120.0
45	126.6	95	122.8	145	121.0	195	120.0
46	126.5	96	122.7	146	121.0	196	120.0
47	126.3	97	122.7	147	121.0	197	120.0
48	126.2	98	122.6	148	121.0	198	119.9
49	126.1	99	122.6	149	120.9	199	119.9
50	126.0	100	122.6	150	120.9	200	119.9

Tableau A VII.135 Résultats PCG ESG-10 PM-4

Masse PCG (g)	5127	densité maximale, dmm		2.515	hauteur mininale, h _{min} (mm)		115.4
Résultats							
N _g irations	hauteur. h (mm)	N _g irations	hauteur. h (mm)	N _g irations	hauteur. h (mm)	N _g irations	hauteur. h (mm)
1	148.2	51	124.1	101	120.8	151	119.2
2	144.9	52	124.0	102	120.7	152	119.2
3	142.5	53	123.9	103	120.7	153	119.2
4	140.7	54	123.8	104	120.6	154	119.2
5	139.2	55	123.7	105	120.6	155	119.2
6	138.0	56	123.6	106	120.6	156	119.1
7	136.9	57	123.5	107	120.5	157	119.1
8	136.0	58	123.4	108	120.5	158	119.1
9	135.2	59	123.3	109	120.5	159	119.1
10	134.4	60	123.2	110	120.4	160	119.0
11	133.8	61	123.1	111	120.4	161	119.0
12	133.2	62	123.0	112	120.4	162	119.0
13	132.6	63	123.0	113	120.3	163	119.0
14	132.1	64	122.9	114	120.3	164	119.0
15	131.7	65	122.8	115	120.2	165	118.9
16	131.2	66	122.7	116	120.2	166	118.9
17	130.8	67	122.7	117	120.2	167	118.9
18	130.4	68	122.6	118	120.1	168	118.9
19	130.1	69	122.5	119	120.1	169	118.9
20	129.7	70	122.4	120	120.1	170	118.8
21	129.4	71	122.4	121	120.1	171	118.8
22	129.1	72	122.3	122	120.0	172	118.8
23	128.8	73	122.2	123	120.0	173	118.8
24	128.6	74	122.2	124	120.0	174	118.8
25	128.3	75	122.1	125	119.9	175	118.7
26	128.0	76	122.0	126	119.9	176	118.7
27	127.8	77	122.0	127	119.9	177	118.7
28	127.6	78	121.9	128	119.8	178	118.7
29	127.4	79	121.9	129	119.8	179	118.7
30	127.1	80	121.8	130	119.8	180	118.7
31	126.9	81	121.7	131	119.8	181	118.6
32	126.8	82	121.7	132	119.7	182	118.6
33	126.6	83	121.6	133	119.7	183	118.6
34	126.4	84	121.6	134	119.7	184	118.6
35	126.2	85	121.5	135	119.6	185	118.6
36	126.0	86	121.5	136	119.6	186	118.6
37	125.9	87	121.4	137	119.6	187	118.5
38	125.7	88	121.4	138	119.6	188	118.5
39	125.6	89	121.3	139	119.5	189	118.5
40	125.4	90	121.3	140	119.5	190	118.5
41	125.3	91	121.2	141	119.5	191	118.5
42	125.2	92	121.2	142	119.5	192	118.5
43	125.0	93	121.1	143	119.4	193	118.4
44	124.9	94	121.1	144	119.4	194	118.4
45	124.8	95	121.0	145	119.4	195	118.4
46	124.6	96	121.0	146	119.4	196	118.4
47	124.5	97	120.9	147	119.3	197	118.4
48	124.4	98	120.9	148	119.3	198	118.4
49	124.3	99	120.9	149	119.3	199	118.3
50	124.2	100	120.8	150	119.3	200	118.3

Tableau A VII.136 Résultats bruts densités maximales (dmm) volet 3

Mix ID	Essai	Mesures					
		Échantillon dans l'air (g)	Récipient rempli d'eau + plaque (g)	Récipient + échantillon + plaque + eau (g)	Densité maximale, dmm	Température de l'eau, T _e (°C)	Densité maximale corrigée
MUN-10 R0	1	1061.2	5156.5	5800.3	2.542	25.1	2.542
	2	1073.1	5155.8	5806.8	2.542	25.1	2.542
	Moyenne	1067.2	5156.2	5803.6	2.542	25.1	2.542
MUN-10 R15 (FM)	1	1091.1	5156.5	5817.7	2.538	25.3	2.538
	2	1197.3	5155.8	5881.4	2.538	25.4	2.538
	Moyenne	1144.2	5156.2	5849.6	2.538	25.4	2.538
MUN-10 R30 (FM)	1	1034.7	5156.5	5783.2	2.536	25.7	2.536
	2	1177.8	5155.8	5870.4	2.543	25.7	2.542
	Moyenne	1106.3	5156.2	5826.8	2.539	25.7	2.539
MUN-10 R45 (FM)	1	1003.8	5155.8	5764.7	2.542	25.1	2.542
	2	1104.1	5166.0	5836.1	2.544	25.1	2.544
	Moyenne	1054.0	5160.9	5800.4	2.543	25.1	2.543
MUN-10 R100 (FM)	1	1269.7	5159.0	5927.0	2.531	25.0	2.531
	2	1379.2	5163.6	5998.9	2.536	25.0	2.536
	Moyenne	1324.5	5161.3	5963.0	2.533	25.0	2.533
MUN-10 R15 (60M)	1	1056.4	5155.8	5793.5	2.523	25.4	2.523
	2	1072.7	5156.5	5804.0	2.523	25.4	2.523
	Moyenne	1064.6	5156.2	5798.8	2.523	25.4	2.523
MUN-10 R30 (60M)	1	1009.2	5156.5	5764.7	2.517	25.1	2.517
	2	1166.4	5155.8	5858.6	2.516	25.1	2.516
	Moyenne	1087.8	5156.2	5811.7	2.516	25.1	2.516
MUN-10 R45 (60M)	1	1101.8	5156.5	5818.7	2.506	25.7	2.506
	2	1021.4	5155.8	5769.4	2.505	25.7	2.504
	Moyenne	1061.6	5156.2	5794.1	2.506	25.7	2.505

Tableau A VII.137 Résultats PCG MUN-10 (R0)

Masse PCG (g)	5221	densité maximale, dmm		2.542	hauteur mininale, h _{min} (mm)		116.3
Résultats							
N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)
1	142.5	51	126.1	101	124.0	151	123.0
2	140.0	52	126.1	102	124.0	152	122.9
3	138.2	53	126.0	103	124.0	153	122.9
4	136.9	54	125.9	104	123.9	154	122.9
5	135.9	55	125.9	105	123.9	155	122.9
6	135.0	56	125.8	106	123.9	156	122.9
7	134.3	57	125.8	107	123.9	157	122.9
8	133.7	58	125.7	108	123.8	158	122.8
9	133.1	59	125.6	109	123.8	159	122.8
10	132.6	60	125.6	110	123.8	160	122.8
11	132.2	61	125.5	111	123.8	161	122.8
12	131.8	62	125.5	112	123.7	162	122.8
13	131.4	63	125.4	113	123.7	163	122.8
14	131.1	64	125.4	114	123.7	164	122.8
15	130.8	65	125.3	115	123.7	165	122.7
16	130.5	66	125.3	116	123.6	166	122.7
17	130.3	67	125.2	117	123.6	167	122.7
18	130.0	68	125.2	118	123.6	168	122.7
19	129.8	69	125.1	119	123.6	169	122.7
20	129.6	70	125.1	120	123.6	170	122.7
21	129.4	71	125.1	121	123.5	171	122.7
22	129.2	72	125.0	122	123.5	172	122.6
23	129.0	73	125.0	123	123.5	173	122.6
24	128.9	74	124.9	124	123.5	174	122.6
25	128.7	75	124.9	125	123.4	175	122.6
26	128.6	76	124.9	126	123.4	176	122.6
27	128.4	77	124.8	127	123.4	177	122.6
28	128.3	78	124.8	128	123.4	178	122.6
29	128.1	79	124.7	129	123.4	179	122.5
30	128.0	80	124.7	130	123.3	180	122.5
31	127.9	81	124.7	131	123.3	181	122.5
32	127.8	82	124.6	132	123.3	182	122.5
33	127.7	83	124.6	133	123.3	183	122.5
34	127.6	84	124.6	134	123.3	184	122.5
35	127.4	85	124.5	135	123.2	185	122.5
36	127.3	86	124.5	136	123.2	186	122.4
37	127.2	87	124.5	137	123.2	187	122.4
38	127.1	88	124.4	138	123.2	188	122.4
39	127.1	89	124.4	139	123.2	189	122.4
40	127.0	90	124.4	140	123.2	190	122.4
41	126.9	91	124.3	141	123.1	191	122.4
42	126.8	92	124.3	142	123.1	192	122.4
43	126.7	93	124.3	143	123.1	193	122.4
44	126.6	94	124.2	144	123.1	194	122.4
45	126.6	95	124.2	145	123.1	195	122.3
46	126.5	96	124.2	146	123.0	196	122.3
47	126.4	97	124.1	147	123.0	197	122.3
48	126.3	98	124.1	148	123.0	198	122.3
49	126.3	99	124.1	149	123.0	199	122.3
50	126.2	100	124.1	150	123.0	200	122.3

Tableau A VII.138 Résultats PCG MUN-10 (R15 FM)

Masse PCG (g)	5234	densité maximale, dmm		2.538	hauteur mininale, h _{min} (mm)		116.8
Résultats							
N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)
1	144.5	51	127.5	101	125.3	151	124.2
2	141.8	52	127.4	102	125.3	152	124.2
3	140.1	53	127.4	103	125.3	153	124.2
4	138.7	54	127.3	104	125.3	154	124.2
5	137.6	55	127.3	105	125.2	155	124.2
6	136.8	56	127.2	106	125.2	156	124.1
7	136.0	57	127.1	107	125.2	157	124.1
8	135.4	58	127.1	108	125.1	158	124.1
9	134.8	59	127.0	109	125.1	159	124.1
10	134.3	60	127.0	110	125.1	160	124.1
11	133.9	61	126.9	111	125.1	161	124.1
12	133.5	62	126.8	112	125.0	162	124.1
13	133.1	63	126.8	113	125.0	163	124.0
14	132.8	64	126.7	114	125.0	164	124.0
15	132.4	65	126.7	115	125.0	165	124.0
16	132.1	66	126.6	116	124.9	166	124.0
17	131.9	67	126.6	117	124.9	167	124.0
18	131.6	68	126.5	118	124.9	168	124.0
19	131.4	69	126.5	119	124.9	169	123.9
20	131.2	70	126.5	120	124.8	170	123.9
21	131.0	71	126.4	121	124.8	171	123.9
22	130.8	72	126.4	122	124.8	172	123.9
23	130.6	73	126.3	123	124.8	173	123.9
24	130.4	74	126.3	124	124.8	174	123.9
25	130.2	75	126.2	125	124.7	175	123.9
26	130.1	76	126.2	126	124.7	176	123.8
27	129.9	77	126.2	127	124.7	177	123.8
28	129.8	78	126.1	128	124.7	178	123.8
29	129.6	79	126.1	129	124.7	179	123.8
30	129.5	80	126.0	130	124.6	180	123.8
31	129.4	81	126.0	131	124.6	181	123.8
32	129.2	82	126.0	132	124.6	182	123.8
33	129.1	83	125.9	133	124.6	183	123.7
34	129.0	84	125.9	134	124.6	184	123.7
35	128.9	85	125.8	135	124.5	185	123.7
36	128.8	86	125.8	136	124.5	186	123.7
37	128.7	87	125.8	137	124.5	187	123.7
38	128.6	88	125.7	138	124.5	188	123.7
39	128.5	89	125.7	139	124.5	189	123.7
40	128.4	90	125.7	140	124.4	190	123.7
41	128.3	91	125.6	141	124.4	191	123.6
42	128.2	92	125.6	142	124.4	192	123.6
43	128.1	93	125.6	143	124.4	193	123.6
44	128.0	94	125.5	144	124.4	194	123.6
45	128.0	95	125.5	145	124.3	195	123.6
46	127.9	96	125.5	146	124.3	196	123.6
47	127.8	97	125.5	147	124.3	197	123.6
48	127.7	98	125.4	148	124.3	198	123.6
49	127.7	99	125.4	149	124.3	199	123.5
50	127.6	100	125.4	150	124.3	200	123.5

Tableau A VII.139 Résultats PCG MUN-10 (R30 FM)

Masse PCG (g)	5269	densité maximale, dmm		2.539	hauteur mininale, h _{min} (mm)		117.5
Résultats							
N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)
1	143.5	51	127.0	101	124.9	151	123.9
2	141.0	52	127.0	102	124.9	152	123.9
3	139.3	53	126.9	103	124.9	153	123.9
4	137.9	54	126.8	104	124.9	154	123.8
5	136.9	55	126.8	105	124.8	155	123.8
6	136.0	56	126.7	106	124.8	156	123.8
7	135.3	57	126.7	107	124.8	157	123.8
8	134.7	58	126.6	108	124.8	158	123.8
9	134.1	59	126.6	109	124.7	159	123.8
10	133.6	60	126.5	110	124.7	160	123.7
11	133.2	61	126.4	111	124.7	161	123.7
12	132.8	62	126.4	112	124.7	162	123.7
13	132.4	63	126.4	113	124.6	163	123.7
14	132.1	64	126.3	114	124.6	164	123.7
15	131.8	65	126.2	115	124.6	165	123.7
16	131.5	66	126.2	116	124.6	166	123.7
17	131.3	67	126.2	117	124.5	167	123.6
18	131.0	68	126.1	118	124.5	168	123.6
19	130.8	69	126.1	119	124.5	169	123.6
20	130.6	70	126.0	120	124.5	170	123.6
21	130.4	71	126.0	121	124.5	171	123.6
22	130.2	72	125.9	122	124.4	172	123.6
23	130.0	73	125.9	123	124.4	173	123.6
24	129.8	74	125.8	124	124.4	174	123.5
25	129.7	75	125.8	125	124.4	175	123.5
26	129.5	76	125.8	126	124.3	176	123.5
27	129.4	77	125.7	127	124.3	177	123.5
28	129.2	78	125.7	128	124.3	178	123.5
29	129.1	79	125.7	129	124.3	179	123.5
30	129.0	80	125.6	130	124.3	180	123.5
31	128.8	81	125.6	131	124.2	181	123.4
32	128.7	82	125.5	132	124.2	182	123.4
33	128.6	83	125.5	133	124.2	183	123.4
34	128.5	84	125.5	134	124.2	184	123.4
35	128.4	85	125.4	135	124.2	185	123.4
36	128.3	86	125.4	136	124.1	186	123.4
37	128.2	87	125.4	137	124.1	187	123.4
38	128.1	88	125.3	138	124.1	188	123.4
39	128.0	89	125.3	139	124.1	189	123.3
40	127.9	90	125.3	140	124.1	190	123.3
41	127.8	91	125.2	141	124.1	191	123.3
42	127.7	92	125.2	142	124.0	192	123.3
43	127.6	93	125.2	143	124.0	193	123.3
44	127.6	94	125.1	144	124.0	194	123.3
45	127.5	95	125.1	145	124.0	195	123.3
46	127.4	96	125.1	146	124.0	196	123.3
47	127.3	97	125.1	147	123.9	197	123.3
48	127.2	98	125.0	148	123.9	198	123.2
49	127.2	99	125.0	149	123.9	199	123.2
50	127.1	100	125.0	150	123.9	200	123.2

Tableau A VII.140 Résultats PCG MUN-10 (R45 FM)

Masse PCG (g)	5243	densité maximale, dmm		2.543	hauteur mininale, h _{min} (mm)		116.7
Résultats							
N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)
1	141.4	51	125.4	101	123.4	151	122.4
2	139.0	52	125.4	102	123.4	152	122.4
3	137.3	53	125.3	103	123.3	153	122.3
4	136.0	54	125.2	104	123.3	154	122.3
5	135.0	55	125.2	105	123.3	155	122.3
6	134.2	56	125.1	106	123.3	156	122.3
7	133.5	57	125.1	107	123.2	157	122.3
8	132.9	58	125.0	108	123.2	158	122.3
9	132.3	59	125.0	109	123.2	159	122.3
10	131.9	60	124.9	110	123.2	160	122.2
11	131.4	61	124.9	111	123.1	161	122.2
12	131.1	62	124.8	112	123.1	162	122.2
13	130.7	63	124.8	113	123.1	163	122.2
14	130.4	64	124.7	114	123.1	164	122.2
15	130.1	65	124.7	115	123.1	165	122.2
16	129.8	66	124.6	116	123.0	166	122.2
17	129.6	67	124.6	117	123.0	167	122.1
18	129.3	68	124.5	118	123.0	168	122.1
19	129.1	69	124.5	119	123.0	169	122.1
20	128.9	70	124.4	120	122.9	170	122.1
21	128.7	71	124.4	121	122.9	171	122.1
22	128.5	72	124.4	122	122.9	172	122.1
23	128.3	73	124.3	123	122.9	173	122.1
24	128.2	74	124.3	124	122.9	174	122.0
25	128.0	75	124.2	125	122.8	175	122.0
26	127.9	76	124.2	126	122.8	176	122.0
27	127.7	77	124.2	127	122.8	177	122.0
28	127.6	78	124.1	128	122.8	178	122.0
29	127.4	79	124.1	129	122.8	179	122.0
30	127.3	80	124.0	130	122.7	180	122.0
31	127.2	81	124.0	131	122.7	181	122.0
32	127.1	82	124.0	132	122.7	182	121.9
33	126.9	83	123.9	133	122.7	183	121.9
34	126.8	84	123.9	134	122.7	184	121.9
35	126.7	85	123.9	135	122.6	185	121.9
36	126.6	86	123.8	136	122.6	186	121.9
37	126.5	87	123.8	137	122.6	187	121.9
38	126.4	88	123.8	138	122.6	188	121.9
39	126.3	89	123.7	139	122.6	189	121.9
40	126.3	90	123.7	140	122.6	190	121.9
41	126.2	91	123.7	141	122.5	191	121.8
42	126.1	92	123.6	142	122.5	192	121.8
43	126.0	93	123.6	143	122.5	193	121.8
44	125.9	94	123.6	144	122.5	194	121.8
45	125.9	95	123.6	145	122.5	195	121.8
46	125.8	96	123.5	146	122.5	196	121.8
47	125.7	97	123.5	147	122.4	197	121.8
48	125.6	98	123.5	148	122.4	198	121.8
49	125.6	99	123.4	149	122.4	199	121.8
50	125.5	100	123.4	150	122.4	200	121.7

Tableau A VII.141 Résultats PCG MUN-10 (R100 FM)

Masse PCG (g)	4890	densité maximale, dmm		2.533	hauteur mininale, h _{min} (mm)		109.3
Résultats							
N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)
1	128.6	51	114.0	101	112.5	151	112.1
2	126.5	52	113.9	102	112.5	152	112.1
3	125.0	53	113.9	103	112.5	153	112.1
4	123.8	54	113.8	104	112.5	154	112.1
5	122.9	55	113.8	105	112.5	155	112.1
6	122.1	56	113.7	106	112.5	156	112.1
7	121.5	57	113.7	107	112.5	157	112.1
8	120.9	58	113.7	108	112.5	158	112.1
9	120.4	59	113.6	109	112.4	159	112.1
10	119.9	60	113.6	110	112.4	160	112.0
11	119.5	61	113.5	111	112.4	161	112.0
12	119.2	62	113.5	112	112.4	162	112.0
13	118.8	63	113.4	113	112.4	163	112.0
14	118.5	64	113.4	114	112.4	164	112.0
15	118.3	65	113.4	115	112.4	165	112.0
16	118.0	66	113.3	116	112.4	166	112.0
17	117.8	67	113.3	117	112.4	167	112.0
18	117.5	68	113.3	118	112.3	168	112.0
19	117.3	69	113.2	119	112.3	169	112.0
20	117.1	70	113.2	120	112.3	170	112.0
21	116.9	71	113.2	121	112.3	171	112.0
22	116.8	72	113.2	122	112.3	172	112.0
23	116.6	73	113.1	123	112.3	173	112.0
24	116.4	74	113.1	124	112.3	174	112.0
25	116.3	75	113.1	125	112.3	175	112.0
26	116.1	76	113.0	126	112.3	176	112.0
27	116.0	77	113.0	127	112.3	177	112.0
28	115.9	78	113.0	128	112.3	178	112.0
29	115.8	79	113.0	129	112.2	179	112.0
30	115.6	80	112.9	130	112.2	180	112.0
31	115.5	81	112.9	131	112.2	181	112.0
32	115.4	82	112.9	132	112.2	182	112.0
33	115.3	83	112.9	133	112.2	183	111.9
34	115.2	84	112.8	134	112.2	184	111.9
35	115.1	85	112.8	135	112.2	185	111.9
36	115.0	86	112.8	136	112.2	186	111.9
37	114.9	87	112.8	137	112.2	187	111.9
38	114.9	88	112.8	138	112.2	188	111.9
39	114.8	89	112.7	139	112.2	189	111.9
40	114.7	90	112.7	140	112.2	190	111.9
41	114.6	91	112.7	141	112.2	191	111.9
42	114.6	92	112.7	142	112.1	192	111.9
43	114.5	93	112.7	143	112.1	193	111.9
44	114.4	94	112.7	144	112.1	194	111.9
45	114.3	95	112.6	145	112.1	195	111.9
46	114.3	96	112.6	146	112.1	196	111.9
47	114.2	97	112.6	147	112.1	197	111.9
48	114.2	98	112.6	148	112.1	198	111.9
49	114.1	99	112.6	149	112.1	199	111.9
50	114.0	100	112.6	150	112.1	200	111.9

Tableau A VII.142 Résultats PCG MUN-10 (R15 60M)

Masse PCG (g)	5265	densité maximale, dmm		2.523	hauteur mininale, h _{min} (mm)		118.2
Résultats							
N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)	N _{girations}	hauteur, h (mm)
1	144.3	51	126.8	101	124.6	151	123.4
2	141.6	52	126.8	102	124.5	152	123.4
3	139.7	53	126.7	103	124.5	153	123.4
4	138.3	54	126.6	104	124.5	154	123.4
5	137.2	55	126.6	105	124.5	155	123.4
6	136.3	56	126.5	106	124.4	156	123.4
7	135.5	57	126.4	107	124.4	157	123.3
8	134.8	58	126.4	108	124.4	158	123.3
9	134.3	59	126.3	109	124.4	159	123.3
10	133.8	60	126.3	110	124.3	160	123.3
11	133.3	61	126.2	111	124.3	161	123.3
12	132.9	62	126.1	112	124.3	162	123.3
13	132.5	63	126.1	113	124.2	163	123.2
14	132.2	64	126.0	114	124.2	164	123.2
15	131.8	65	126.0	115	124.2	165	123.2
16	131.5	66	125.9	116	124.2	166	123.2
17	131.3	67	125.9	117	124.1	167	123.2
18	131.0	68	125.8	118	124.1	168	123.2
19	130.8	69	125.8	119	124.1	169	123.1
20	130.5	70	125.7	120	124.1	170	123.1
21	130.3	71	125.7	121	124.1	171	123.1
22	130.1	72	125.6	122	124.0	172	123.1
23	129.9	73	125.6	123	124.0	173	123.1
24	129.8	74	125.5	124	124.0	174	123.1
25	129.6	75	125.5	125	124.0	175	123.1
26	129.4	76	125.5	126	123.9	176	123.0
27	129.3	77	125.4	127	123.9	177	123.0
28	129.1	78	125.4	128	123.9	178	123.0
29	129.0	79	125.3	129	123.9	179	123.0
30	128.8	80	125.3	130	123.9	180	123.0
31	128.7	81	125.3	131	123.8	181	123.0
32	128.6	82	125.2	132	123.8	182	123.0
33	128.5	83	125.2	133	123.8	183	122.9
34	128.3	84	125.1	134	123.8	184	122.9
35	128.2	85	125.1	135	123.7	185	122.9
36	128.1	86	125.1	136	123.7	186	122.9
37	128.0	87	125.0	137	123.7	187	122.9
38	127.9	88	125.0	138	123.7	188	122.9
39	127.8	89	125.0	139	123.7	189	122.9
40	127.7	90	124.9	140	123.6	190	122.9
41	127.6	91	124.9	141	123.6	191	122.8
42	127.5	92	124.9	142	123.6	192	122.8
43	127.4	93	124.8	143	123.6	193	122.8
44	127.4	94	124.8	144	123.6	194	122.8
45	127.3	95	124.8	145	123.6	195	122.8
46	127.2	96	124.7	146	123.5	196	122.8
47	127.1	97	124.7	147	123.5	197	122.8
48	127.0	98	124.7	148	123.5	198	122.8
49	127.0	99	124.6	149	123.5	199	122.7
50	126.9	100	124.6	150	123.5	200	122.7

Tableau A VII.143 Résultats PCG MUN-10 (R30 60M)

Masse PCG (g)	5288	densité maximale, dmm		2.516	hauteur mininale, h _{min} (mm)		119.0
Résultats							
N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)
1	142.7	51	126.2	101	124.0	151	123.0
2	140.2	52	126.1	102	124.0	152	123.0
3	138.5	53	126.0	103	124.0	153	123.0
4	137.2	54	126.0	104	123.9	154	123.0
5	136.2	55	125.9	105	123.9	155	122.9
6	135.3	56	125.9	106	123.9	156	122.9
7	134.6	57	125.8	107	123.9	157	122.9
8	134.0	58	125.7	108	123.8	158	122.9
9	133.4	59	125.7	109	123.8	159	122.9
10	132.9	60	125.6	110	123.8	160	122.9
11	132.5	61	125.6	111	123.8	161	122.9
12	132.1	62	125.5	112	123.8	162	122.8
13	131.7	63	125.5	113	123.7	163	122.8
14	131.4	64	125.4	114	123.7	164	122.8
15	131.1	65	125.4	115	123.7	165	122.8
16	130.8	66	125.3	116	123.7	166	122.8
17	130.5	67	125.3	117	123.6	167	122.8
18	130.3	68	125.2	118	123.6	168	122.8
19	130.0	69	125.2	119	123.6	169	122.7
20	129.8	70	125.1	120	123.6	170	122.7
21	129.6	71	125.1	121	123.5	171	122.7
22	129.4	72	125.0	122	123.5	172	122.7
23	129.2	73	125.0	123	123.5	173	122.7
24	129.1	74	124.9	124	123.5	174	122.7
25	128.9	75	124.9	125	123.5	175	122.7
26	128.7	76	124.9	126	123.4	176	122.7
27	128.6	77	124.8	127	123.4	177	122.6
28	128.4	78	124.8	128	123.4	178	122.6
29	128.3	79	124.7	129	123.4	179	122.6
30	128.2	80	124.7	130	123.4	180	122.6
31	128.0	81	124.7	131	123.3	181	122.6
32	127.9	82	124.6	132	123.3	182	122.6
33	127.8	83	124.6	133	123.3	183	122.6
34	127.7	84	124.6	134	123.3	184	122.6
35	127.6	85	124.5	135	123.3	185	122.6
36	127.4	86	124.5	136	123.3	186	122.5
37	127.3	87	124.5	137	123.2	187	122.5
38	127.2	88	124.4	138	123.2	188	122.5
39	127.1	89	124.4	139	123.2	189	122.5
40	127.1	90	124.4	140	123.2	190	122.5
41	127.0	91	124.3	141	123.2	191	122.5
42	126.9	92	124.3	142	123.1	192	122.5
43	126.8	93	124.3	143	123.1	193	122.5
44	126.7	94	124.2	144	123.1	194	122.5
45	126.6	95	124.2	145	123.1	195	122.4
46	126.5	96	124.2	146	123.1	196	122.4
47	126.5	97	124.1	147	123.1	197	122.4
48	126.4	98	124.1	148	123.1	198	122.4
49	126.3	99	124.1	149	123.0	199	122.4
50	126.2	100	124.1	150	123.0	200	122.4

Tableau A VII.144 Résultats PCG MUN-10 (45 60M)

Masse PCG (g)	5166	densité maximale, dmm		2.505	hauteur mininale, h _{min} (mm)		116.7
Résultats							
N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)	N _g irations	hauteur, h (mm)
1	138.2	51	122.2	101	120.3	151	119.6
2	135.8	52	122.2	102	120.3	152	119.6
3	134.2	53	122.1	103	120.3	153	119.6
4	132.9	54	122.1	104	120.3	154	119.6
5	131.9	55	122.0	105	120.2	155	119.6
6	131.1	56	121.9	106	120.2	156	119.6
7	130.4	57	121.9	107	120.2	157	119.6
8	129.8	58	121.8	108	120.2	158	119.5
9	129.3	59	121.8	109	120.2	159	119.5
10	128.8	60	121.7	110	120.1	160	119.5
11	128.4	61	121.7	111	120.1	161	119.5
12	128.0	62	121.6	112	120.1	162	119.5
13	127.6	63	121.6	113	120.1	163	119.5
14	127.3	64	121.5	114	120.1	164	119.5
15	127.0	65	121.5	115	120.1	165	119.5
16	126.7	66	121.4	116	120.0	166	119.5
17	126.5	67	121.4	117	120.0	167	119.5
18	126.2	68	121.4	118	120.0	168	119.5
19	126.0	69	121.3	119	120.0	169	119.5
20	125.8	70	121.3	120	120.0	170	119.5
21	125.6	71	121.2	121	120.0	171	119.5
22	125.4	72	121.2	122	119.9	172	119.5
23	125.2	73	121.2	123	119.9	173	119.5
24	125.0	74	121.1	124	119.9	174	119.4
25	124.9	75	121.1	125	119.9	175	119.4
26	124.7	76	121.0	126	119.9	176	119.4
27	124.6	77	121.0	127	119.9	177	119.4
28	124.4	78	121.0	128	119.9	178	119.4
29	124.3	79	120.9	129	119.8	179	119.4
30	124.2	80	120.9	130	119.8	180	119.4
31	124.0	81	120.9	131	119.8	181	119.4
32	123.9	82	120.8	132	119.8	182	119.4
33	123.8	83	120.8	133	119.8	183	119.4
34	123.7	84	120.8	134	119.8	184	119.4
35	123.6	85	120.7	135	119.8	185	119.4
36	123.5	86	120.7	136	119.8	186	119.4
37	123.4	87	120.7	137	119.7	187	119.4
38	123.3	88	120.7	138	119.7	188	119.4
39	123.2	89	120.6	139	119.7	189	119.4
40	123.1	90	120.6	140	119.7	190	119.4
41	123.0	91	120.6	141	119.7	191	119.4
42	122.9	92	120.6	142	119.7	192	119.4
43	122.8	93	120.5	143	119.7	193	119.4
44	122.7	94	120.5	144	119.7	194	119.4
45	122.7	95	120.5	145	119.7	195	119.4
46	122.6	96	120.5	146	119.6	196	119.3
47	122.5	97	120.4	147	119.6	197	119.3
48	122.4	98	120.4	148	119.6	198	119.3
49	122.4	99	120.4	149	119.6	199	119.3
50	122.3	100	120.4	150	119.6	200	119.3

Tableau A VII.145 Résultats d'orniérage à 52 °C (MUN-10 R0)

Localisation sur plaque		Cycle à froid		Cycles à chaud			
		Lecture initiale	1000	1000	3000	10000	30000
MOULE Gauche A5 50	1 Avant	10.70	13.81	15.06	15.69	16.22	17.07
	1 Centre	10.87	13.65	15.47	16.04	16.16	16.86
	1 Arrière	10.95	13.66	15.40	16.14	16.98	17.76
	2 Avant	11.09	13.42	16.83	18.10	20.18	22.6
	2 Centre	11.58	14.06	18.17	20.30	22.01	25.41
	2 Arrière	11.59	14.05	16.77	18.67	21.08	24.37
	3 Avant	10.89	13.85	16.84	18.93	22.11	25.43
	3 Centre	11.49	14.11	17.91	20.78	24.85	29.12
	3 Arrière	12.04	14.29	16.99	19.12	22.49	27.18
	4 Avant	11.42	13.47	16.01	18.56	21.24	24.49
	4 Centre	11.57	14.04	17.38	20.00	22.85	26.28
	4 Arrière	11.81	14.10	16.50	18.93	21.51	24.43
	5 Avant	10.11	11.98	14.71	16.28	17.11	20.12
	5 Centre	10.75	12.88	15.46	17.82	18.84	21.13
	5 Arrière	10.92	12.63	15.20	16.48	17.90	20
MOULE Droite	6 Avant	10.61	11.57	12.76	12.96	12.72	13.95
A1 50	6 Centre	10.28	10.99	12.54	12.72	12.77	14.74
	6 Arrière	9.78	10.96	11.71	12.70	12.54	13.45
	7 Avant	10.99	12.32	13.49	13.53	13.85	17.74
	7 Centre	10.49	11.60	12.81	13.16	13.68	18.89
	7 Arrière	10.63	12.17	13.45	13.42	13.97	18.44
	8 Avant	11.22	12.83	13.41	14.13	14.62	20.02
	8 Centre	10.92	12.20	13.01	13.25	13.64	21.38
	8 Arrière	10.61	12.24	13.19	13.26	13.96	20.31
	9 Avant	10.28	13.06	14.41	14.65	14.95	19.87
	9 Centre	9.94	12.44	14.42	14.52	14.79	21.43
	9 Arrière	9.90	12.24	13.69	14.20	14.04	19.99
	10 Avant	9.72	12.09	13.63	14.22	14.58	16.57
	10 Centre	9.34	12.22	13.70	13.70	13.58	18.07
	10 Arrière	9.46	11.73	12.72	14.95	13.54	17.01
%PO	Gauche		5.0	5.6	9.3	13.4	18.9
	Droite		3.5	2.4	3.2	3.5	12.0

Tableau A VII.146 Résultats d'orniérage à 52 °C (MUN-10 R15 FM)

Localisation sur plaque		Cycle à froid		Cycles à chaud			
		Lecture initiale	1000	1000	3000	10000	30000
MOULE Gauche A5 50	1 Avant	11.19	13.05	13.95	13.42	14.41	14.53
	1 Centre	10.35	12.63	13.68	14.31	15.09	15.22
	1 Arrière	9.47	11.43	12.03	12.61	13.21	13.28
	2 Avant	11.82	14.04	15.15	16.21	17.87	18.12
	2 Centre	11.24	14.78	15.96	17.56	19.76	19.98
	2 Arrière	11.16	13.59	15.24	16.53	18.40	18.29
	3 Avant	12.74	15.18	16.84	17.89	19.60	19.79
	3 Centre	11.93	15.68	17.20	18.43	20.94	20.86
	3 Arrière	11.86	14.44	16.10	17.11	19.31	19.42
	4 Avant	13.12	15.10	16.78	17.26	19.19	19.12
	4 Centre	12.42	14.84	17.44	18.47	20.60	20.74
	4 Arrière	11.56	13.59	16.59	17.11	19.00	18.64
	5 Avant	11.26	13.67	14.95	15.53	16.73	16.76
	5 Centre	10.66	12.91	15.65	16.31	17.18	17.5
	5 Arrière	10.32	12.35	13.98	14.90	16.05	16.3
MOULE Droite	6 Avant	12.82	14.41	15.09	14.13	15.85	16.3
A1 50	6 Centre	11.78	13.20	15.23	15.78	16.34	16.78
	6 Arrière	10.82	12.50	14.16	14.82	15.54	15.7
	7 Avant	13.22	15.10	16.72	18.40	20.90	21.26
	7 Centre	12.26	14.26	16.58	19.08	22.22	22.65
	7 Arrière	11.06	12.66	14.95	17.12	21.15	21.35
	8 Avant	13.10	15.14	16.99	18.94	23.56	23.73
	8 Centre	12.28	13.98	16.51	19.40	25.95	26.47
	8 Arrière	11.13	13.09	15.38	17.92	24.33	24.46
	9 Avant	11.96	14.45	16.50	17.84	21.77	21.69
	9 Centre	10.71	13.55	16.35	18.84	24.59	24.35
	9 Arrière	9.99	12.82	15.50	18.05	22.57	22.66
	10 Avant	9.03	11.90	13.54	14.80	16.34	16.2
%PO	Gauche		5.0	3.3	5.0	8.3	8.4
	Droite		4.4	4.0	7.5	14.2	14.4

Tableau A VII.147 Résultats d'orniérage à 52 °C (MUN-10 R30 FM)

Localisation sur plaque		Cycle à froid		Cycles à chaud			
		Lecture initiale	1000	1000	3000	10000	30000
MOULE Gauche A5 50	1 Avant	9.02	9.97	11.42	11.76	12.13	12.67
	1 Centre	9.35	10.12	11.98	12.07	12.49	12.99
	1 Arrière	9.24	10.20	12.03	12.43	13.11	13.92
	2 Avant	10.94	11.71	13.48	14.02	15.02	17.62
	2 Centre	11.23	12.37	14.57	15.46	17.62	19.4
	2 Arrière	11.30	12.75	14.52	15.30	16.73	17.99
	3 Avant	11.82	12.53	14.27	15.76	18.27	21.36
	3 Centre	12.61	13.70	15.23	16.40	20.36	22.69
	3 Arrière	13.19	14.47	16.12	16.86	18.50	20.96
	4 Avant	12.01	13.06	15.03	15.84	17.91	20.1
	4 Centre	12.79	14.20	16.34	17.17	19.32	22.44
	4 Arrière	13.27	14.69	17.05	17.85	19.48	21.41
	5 Avant	11.58	12.30	13.30	14.78	15.74	17.47
	5 Centre	12.21	13.00	16.26	17.36	18.17	19.47
	5 Arrière	12.85	14.02	16.37	16.74	17.84	19.3
MOULE Droite	6 Avant	9.71	10.94	13.21	13.65	13.96	14.71
A1 50	6 Centre	10.04	11.51	13.66	14.48	14.70	14.7
	6 Arrière	10.56	12.02	14.05	14.55	14.72	15.01
	7 Avant	11.06	12.18	14.61	15.70	17.73	19.68
	7 Centre	11.78	13.09	15.92	17.29	18.67	20.34
	7 Arrière	12.22	13.34	15.89	17.02	18.48	19.92
	8 Avant	11.60	13.11	15.07	16.11	18.40	20.63
	8 Centre	12.19	13.68	16.78	17.42	20.09	22.36
	8 Arrière	12.44	13.80	16.75	17.67	19.06	21.54
	9 Avant	11.85	12.94	15.09	15.85	17.19	18.39
	9 Centre	12.24	13.85	15.93	17.01	18.99	20.73
	9 Arrière	12.65	14.12	16.47	17.21	18.52	20.22
	10 Avant	11.25	12.27	14.54	15.08	15.80	16.7
	10 Centre	11.87	12.81	15.80	16.32	17.32	18.01
	10 Arrière	12.26	13.30	15.46	15.87	16.87	17.33
%PO	Gauche		2.2	4.0	5.6	8.8	13.2
	Droite		2.6	4.9	6.5	9.1	13.4

Tableau A VII.148 Résultats d'orniérage à 52 °C (MUN-10 R45 FM)

Localisation sur plaque		Cycle à froid		Cycles à chaud			
		Lecture initiale	1000	1000	3000	10000	30000
MOULE Gauche A5 50	1 Avant	11.95	12.51	14.30	14.76	15.28	15.81
	1 Centre	11.59	12.77	14.13	14.94	15.78	16.5
	1 Arrière	11.26	12.31	13.50	14.72	15.66	16.09
	2 Avant	13.23	14.04	15.01	15.78	16.59	18.67
	2 Centre	12.23	12.93	14.58	15.67	17.53	20
	2 Arrière	11.94	12.82	14.23	14.90	16.15	18.72
	3 Avant	12.98	13.38	15.21	15.29	16.83	17.96
	3 Centre	12.22	12.94	14.28	15.24	16.70	19.12
	3 Arrière	11.76	12.56	14.26	14.75	16.12	17.7
	4 Avant	12.46	13.00	14.53	15.09	15.51	16.74
	4 Centre	11.54	12.13	13.79	14.66	15.96	17.67
	4 Arrière	10.92	11.62	12.96	13.63	14.62	16.16
	5 Avant	10.19	10.86	12.24	12.76	13.28	14.38
	5 Centre	9.25	9.92	11.75	12.39	13.44	14.83
	5 Arrière	8.62	9.14	10.46	11.20	11.97	12.91
MOULE Droite	6 Avant	9.69	10.74	13.05	13.29	13.65	14.04
A1 50	6 Centre	10.51	11.45	13.61	14.00	14.49	14.76
	6 Arrière	10.53	11.32	12.96	13.20	13.72	13.7
	7 Avant	10.57	11.50	14.26	14.77	15.98	17.02
	7 Centre	10.80	12.00	15.03	15.52	17.11	18.39
	7 Arrière	11.71	12.64	15.03	15.53	16.66	17.62
	8 Avant	11.62	12.75	15.55	15.92	16.80	18.35
	8 Centre	11.98	13.28	15.76	16.84	17.92	19.57
	8 Arrière	12.32	13.22	14.84	16.00	16.72	18.37
	9 Avant	11.12	11.97	14.08	14.58	15.62	16.85
	9 Centre	11.91	13.22	15.43	16.53	17.56	19.42
	9 Arrière	12.04	13.19	15.07	15.50	16.56	18.66
	10 Avant	10.73	11.54	13.56	14.22	15.26	15.49
	10 Centre	11.36	12.46	14.46	15.14	16.39	17.38
	10 Arrière	11.35	12.37	14.34	14.64	15.77	16.98
%PO	Gauche		1.5	3.1	4.5	6.7	9.7
	Droite		2.1	4.5	5.6	7.6	9.8

Tableau A VII.149 Résultats d'orniérage à 52 °C (MUN-10 R100 FM)

Localisation sur plaque		Cycle à froid		Cycles à chaud			
		Lecture initiale	1000	1000	3000	10000	30000
MOULE Gauche A5 50	1 Avant	7.92	8.81	9.23	9.63	10.47	10.96
	1 Centre	8.64	9.30	10.01	10.57	11.46	11.99
	1 Arrière	8.95	9.46	9.79	10.50	10.85	11.63
	2 Avant	9.76	10.39	10.85	11.34	11.72	12.43
	2 Centre	10.09	11.15	11.01	12.20	12.40	13.4
	2 Arrière	10.38	10.81	11.42	11.42	11.89	12.59
	3 Avant	11.12	11.75	12.45	12.71	13.34	14.04
	3 Centre	11.25	12.00	12.78	13.10	13.55	14.45
	3 Arrière	11.65	12.20	12.87	13.31	13.62	14.12
	4 Avant	12.37	13.10	13.23	13.64	14.17	14.04
	4 Centre	12.21	12.73	13.30	13.94	14.63	15.35
	4 Arrière	12.04	12.22	12.92	13.33	13.79	14.47
	5 Avant	11.63	12.28	12.86	13.33	14.08	14.38
	5 Centre	12.06	12.80	13.72	14.18	14.90	15.74
	5 Arrière	11.43	12.22	13.13	13.40	14.03	14.85
MOULE Droite	6 Avant	9.45	9.51	10.17	10.82	11.40	12.47
A1 50	6 Centre	9.43	9.62	10.61	11.14	11.99	12.83
	6 Arrière	9.66	9.87	10.67	10.90	11.65	12.05
	7 Avant	9.43	9.63	10.35	10.64	10.68	11.71
	7 Centre	9.34	9.52	10.66	11.16	11.99	12.81
	7 Arrière	9.75	9.83	10.70	11.09	11.38	12.38
	8 Avant	8.94	9.32	10.02	10.29	11.26	11.73
	8 Centre	9.72	10.57	10.96	11.71	12.74	13.6
	8 Arrière	9.38	9.56	10.47	10.81	11.45	12.06
	9 Avant	8.52	10.18	10.73	11.09	11.86	12.52
	9 Centre	8.67	9.79	10.54	11.00	11.93	12.96
	9 Arrière	9.15	10.61	11.10	11.42	11.97	12.93
	10 Avant	9.24	10.55	11.07	11.49	12.26	13.23
	10 Centre	8.54	10.48	11.15	11.94	13.05	14.12
	10 Arrière	9.22	11.19	11.59	12.20	12.87	13.82
%PO	Gauche		1.3	1.1	2.1	3.2	4.5
	Droite		1.5	1.4	2.2	3.6	5.3

Tableau A VII.150 Résultats d'orniérage à 52 °C (MUN-10 R15 60M)

Localisation sur plaque		Cycle à froid		Cycles à chaud			
		Lecture initiale	1000	1000	3000	10000	30000
MOULE Gauche A5 50	1 Avant	12.31	14.53	15.65	15.92	16.37	16.77
	1 Centre	11.89	14.27	16.36	16.68	17.26	17.86
	1 Arrière	10.97	13.43	15.31	15.88	16.55	17.17
	2 Avant	13.02	14.98	18.62	19.34	21.68	23.86
	2 Centre	12.39	15.36	19.54	20.58	23.47	25.67
	2 Arrière	11.41	14.35	18.12	18.43	21.08	23.8
	3 Avant	12.76	14.98	18.55	19.65	21.71	25.27
	3 Centre	12.52	15.08	18.59	19.87	21.77	26.5
	3 Arrière	11.50	13.75	16.85	18.14	20.46	24.45
	4 Avant	12.08	13.86	17.08	17.60	19.15	21.47
	4 Centre	11.47	13.86	17.54	18.56	20.58	23.35
	4 Arrière	10.43	13.30	16.51	17.20	19.03	21.34
	5 Avant	10.11	12.23	14.53	14.97	16.01	16.91
	5 Centre	9.78	11.92	15.37	15.94	17.36	18.46
	5 Arrière	8.88	11.29	14.70	14.55	15.54	17.29
MOULE Droite	6 Avant	12.00	13.55	15.03	15.36	15.74	16.14
A1 50	6 Centre	11.79	13.81	15.15	15.45	16.01	16.48
	6 Arrière	10.93	12.85	14.44	14.77	15.25	15.67
	7 Avant	12.61	14.63	16.75	17.76	18.57	19.82
	7 Centre	12.07	14.19	17.03	17.70	18.94	20.75
	7 Arrière	11.58	13.45	15.80	16.28	17.81	19.23
	8 Avant	12.84	14.77	17.26	17.84	18.90	20.31
	8 Centre	12.09	13.88	17.38	18.42	19.81	21.78
	8 Arrière	11.46	13.06	16.47	17.25	18.58	20.58
	9 Avant	11.45	13.89	16.50	16.91	17.87	19.21
	9 Centre	10.89	13.22	16.19	16.99	18.18	20.02
	9 Arrière	10.86	12.47	15.11	16.11	16.89	18.88
	10 Avant	9.98	12.16	14.48	14.89	15.80	16.74
	10 Centre	9.35	11.53	13.69	14.22	14.93	16.66
	10 Arrière	11.21	12.19	13.94	14.35	14.96	16.08
%PO	Gauche		4.9	6.3	7.7	11.1	15.6
	Droite		3.8	4.8	6.0	7.9	10.6

Tableau A VII.151 Résultats d'orniérage à 52 °C (MUN-10 R30 60M)

Localisation sur plaque		Cycle à froid		Cycles à chaud			
		Lecture initiale	1000	1000	3000	10000	30000
MOULE Gauche A5 50	1 Avant	10.51	11.98	13.70	14.13	14.81	15.61
	1 Centre	11.35	13.02	14.51	14.91	15.34	16.13
	1 Arrière	11.47	13.20	14.58	15.00	15.32	16.05
	2 Avant	11.94	13.30	15.72	16.74	18.83	22.33
	2 Centre	13.06	14.95	17.90	19.04	20.67	23.56
	2 Arrière	13.07	14.76	17.34	18.28	19.57	21.85
	3 Avant	13.28	14.36	16.33	17.11	19.19	22.68
	3 Centre	13.48	15.10	18.02	18.89	21.27	25.3
	3 Arrière	13.90	15.41	17.57	18.11	19.85	23.08
	4 Avant	13.32	14.81	17.22	17.56	19.57	22.5
	4 Centre	13.60	15.33	18.16	19.05	20.55	23.77
	4 Arrière	13.49	15.26	17.71	18.34	19.79	22.08
	5 Avant	12.45	13.58	15.90	17.01	18.24	19.79
	5 Centre	12.97	14.21	16.45	17.28	18.91	20.73
	5 Arrière	13.18	14.61	16.64	17.14	18.35	19.67
MOULE Droite	6 Avant	13.55	14.74	15.93	16.05	16.46	16.85
A1 50	6 Centre	12.54	14.36	15.76	16.03	16.30	16.71
	6 Arrière	11.60	13.48	15.39	15.56	15.87	16.4
	7 Avant	14.92	16.03	18.22	18.82	19.58	21.01
	7 Centre	13.77	15.26	18.25	19.16	19.91	22.06
	7 Arrière	12.87	14.41	17.27	17.74	18.75	21.36
	8 Avant	14.81	15.65	18.18	18.43	19.61	21.98
	8 Centre	13.90	15.32	18.47	19.10	21.04	23.95
	8 Arrière	12.93	14.29	16.99	17.53	19.40	22.83
	9 Avant	14.12	15.26	18.12	18.88	19.59	21.93
	9 Centre	13.51	15.21	18.47	18.80	20.04	22.62
	9 Arrière	12.42	13.49	16.51	17.34	18.66	21.68
	10 Avant	11.90	13.10	15.92	16.44	17.12	18.32
	10 Centre	11.60	12.71	15.49	16.79	17.77	18.68
	10 Arrière	11.05	12.27	14.94	15.39	16.31	17.54
%PO	Gauche		3.2	4.8	6.3	9.4	14.3
	Droite		2.8	5.3	6.5	8.4	12.3

Tableau A VII.152 Résultats d'orniérage à 52 °C (MUN-10 R45 60M)

Localisation sur plaque		Cycle à froid		Cycles à chaud			
		Lecture initiale	1000	1000	3000	10000	30000
MOULE Gauche A5 50	1 Avant	9.99	10.92	12.86	13.33	13.90	14.58
	1 Centre	10.93	12.27	14.02	14.53	14.78	15.37
	1 Arrière	11.42	12.91	14.13	14.66	14.96	15.6
	2 Avant	12.05	13.36	15.54	16.07	17.75	20.05
	2 Centre	12.87	14.21	17.13	18.33	19.94	22.38
	2 Arrière	12.91	14.53	16.99	17.84	19.14	21.25
	3 Avant	13.15	14.22	16.74	17.40	18.84	21.48
	3 Centre	13.70	15.07	18.05	19.09	21.15	24.1
	3 Arrière	14.18	15.33	17.88	18.60	20.26	22.53
	4 Avant	12.87	15.03	16.18	17.77	18.11	20.14
	4 Centre	14.47	15.80	18.26	19.10	20.52	22.76
	4 Arrière	14.88	15.55	17.71	18.30	19.34	21.31
	5 Avant	12.81	13.79	15.49	16.10	16.89	18.29
	5 Centre	13.84	15.08	17.32	17.70	18.62	20.21
	5 Arrière	13.97	14.72	16.22	16.54	17.65	19.21
MOULE Droite	6 Avant	8.82	10.40	12.28	13.15	14.96	16.17
A1 50	6 Centre	10.11	11.62	13.80	14.60	15.54	16.47
	6 Arrière	10.62	11.83	13.62	14.05	14.62	15.63
	7 Avant	10.85	12.10	14.65	15.80	17.91	19.92
	7 Centre	11.90	13.07	15.74	17.14	18.81	21.54
	7 Arrière	12.21	13.02	15.24	16.69	17.97	19.92
	8 Avant	11.68	12.67	15.39	16.31	18.40	20.87
	8 Centre	12.47	13.56	16.20	17.05	19.66	22.45
	8 Arrière	13.49	13.88	16.83	17.91	19.45	21.6
	9 Avant	12.46	13.57	16.20	17.11	18.67	20.55
	9 Centre	13.14	14.68	17.02	17.81	19.42	21.95
	9 Arrière	13.47	15.10	16.84	17.85	18.94	21.09
	10 Avant	12.23	13.66	15.98	16.91	18.20	19.99
	10 Centre	13.66	15.13	17.35	18.21	19.46	21.55
	10 Arrière	13.97	15.24	17.43	17.95	19.46	21.42
%PO	Gauche		2.7	4.5	6.0	8.4	12.3
	Droite		2.5	4.8	6.7	9.8	13.8

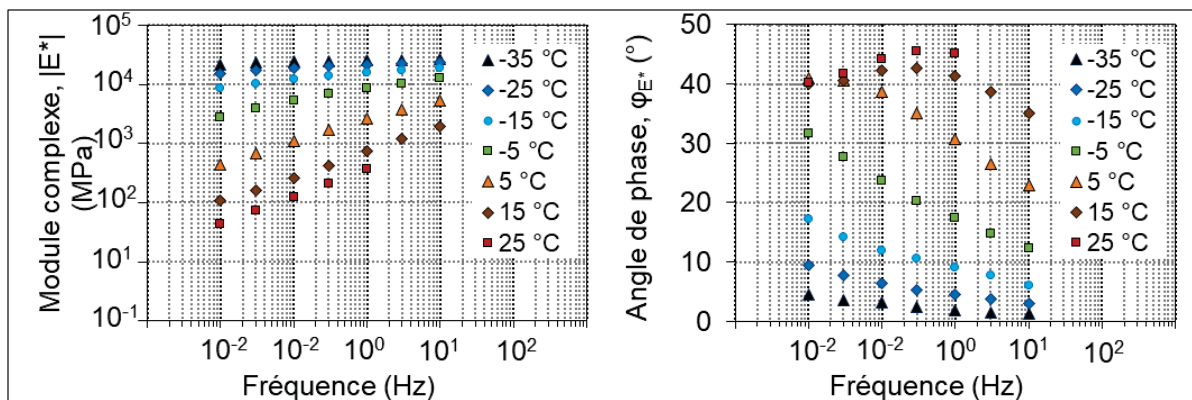


Figure A VII.53 Courbes isothermes MUN-10 R0

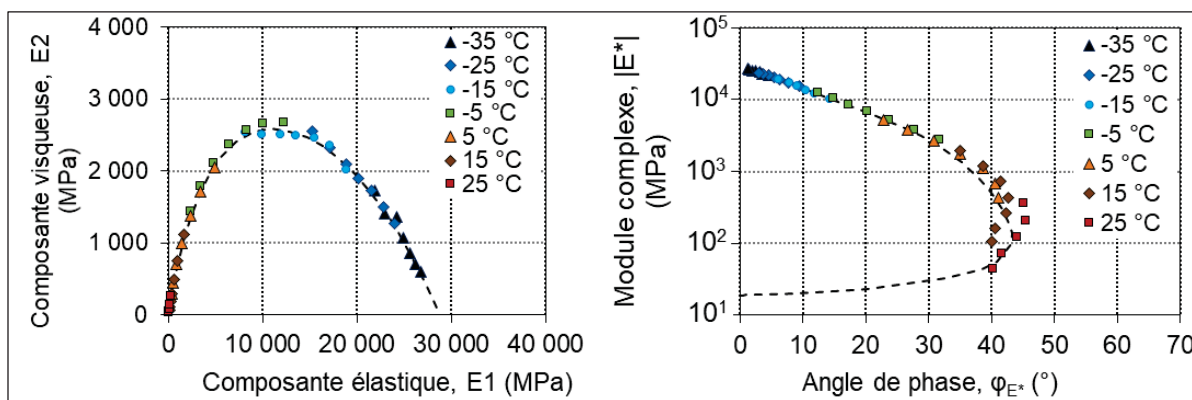


Figure A VII.54 Plans Cole-Cole et black MUN-10 R0

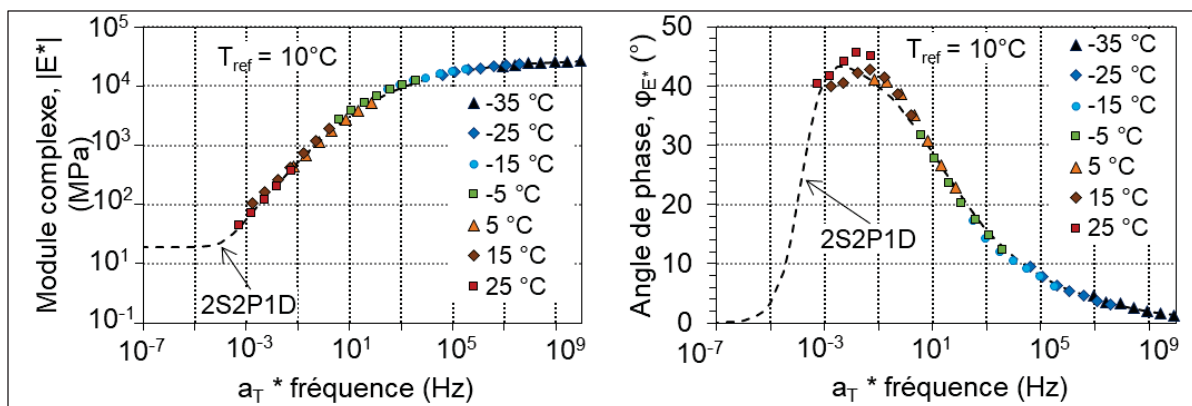


Figure A VII.55 Courbes maîtresses MUN-10 R0

Tableau A VII.153 Résultats module MUN-10 R0

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)	Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)
-35.0	9.99	26797	1.3	4.9	9.99	5290.5	22.9
	3.01	26145	1.5		3.01	3808.7	26.6
	1.00	25623	1.9		1.00	2679.9	30.8
	0.30	24912	2.5		0.30	1729.7	35.0
	0.10	24231	3.2		0.10	1119.6	38.7
	0.03	23025	3.5		0.03	692.6	40.6
	0.01	21910	4.5		0.01	438.0	41.0
-24.9	9.98	23956	3.0	14.9	9.98	1953.2	35.0
	3.01	22893	3.7		3.01	1193.7	38.7
	1.00	21635	4.6		1.00	738.4	41.4
	0.30	20254	5.4		0.30	426.5	42.7
	0.10	18941	6.3		0.10	265.8	42.3
	0.03	17316	7.7		0.03	162.0	40.6
	0.01	15497	9.5		0.01	106.3	40.0
-15.0	10.05	19017	6.1	24.9	10.05	367.1	45.1
	3.00	17297	7.8		3.00	205.3	45.5
	1.00	15644	9.0		1.00	122.2	44.1
	0.30	13678	10.5		0.30	72.0	41.7
	0.10	12089	12.0		0.10	44.2	40.3
	0.03	10174	14.3		0.03	23.1	42.0
	0.01	8535	17.2		0.01	12.6	47.8
-5.0	10.02	12502	12.4	34.8	10.02	145.6	164.7
	3.01	10378	14.9		3.01	147.6	193.3
	1.00	8632	17.3		1.00	157.7	192.1
	0.30	6832	20.3		0.30	184.8	151.8
	0.10	5276	23.6		0.10	153.6	236.1
	0.03	3845	27.7		0.03	79.2	171.2
	0.01	2743	31.8		0.01	259.5	171.1
2S2P1D (T _{ref} : 10°C)							
E00 (MPa): 19	E0 (MPa): 28750	k: 0.190	h: 0.500	δ: 2.250	β: 1000	C1: 39.3	C2: 243
Temperature (°C)			-35.0	-24.9	-15.0	-5.0	4.9
Tau			6.40E+05	5.56E+03	5.00E+01	7.50E-01	5.00E-03
Temperature (°C)			10.0	14.9	24.9		
Tau			7.27E-04	2.10E-04	3.90E-06		

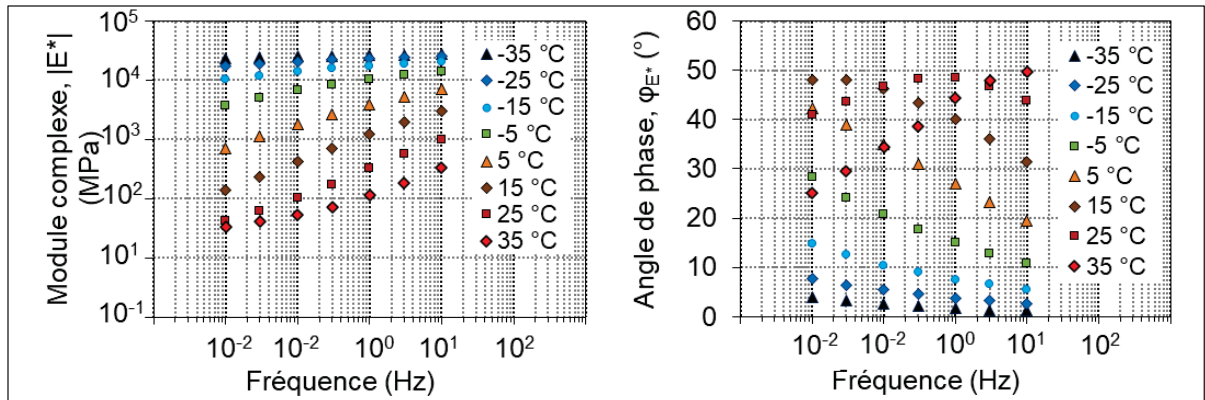
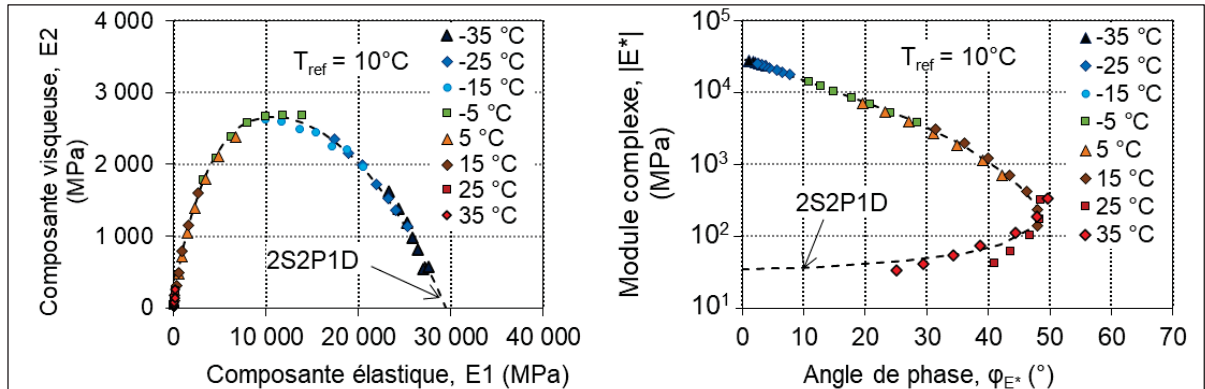
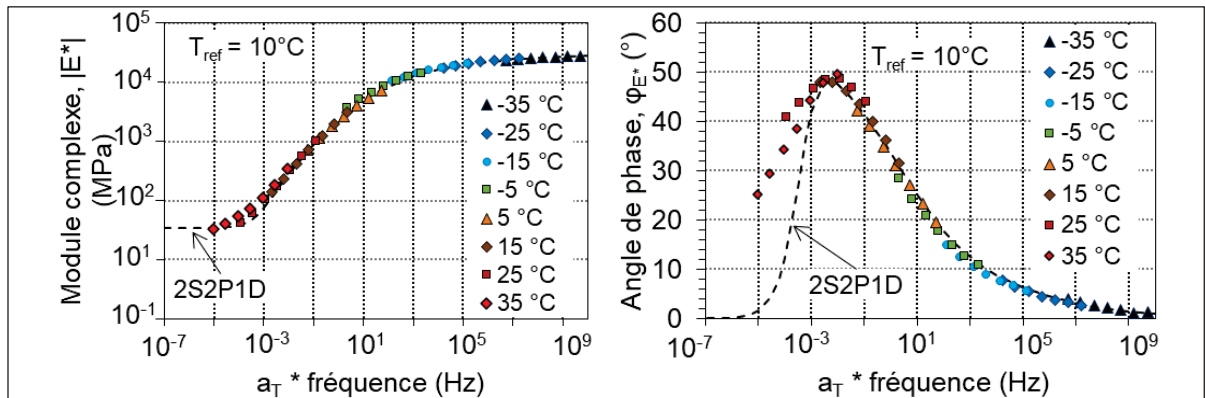
Figure A VII.56 Courbes isothermes MUN-10 R15_{FM}Figure A VII.57 Plans Cole-Cole et black MUN-10 R15_{FM}Figure A VII.58 Courbes maîtresses MUN-10 R15_{FM}

Tableau A VII.154 MUN-10 R15_{FM}

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, ϕ (°)	Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, ϕ (°)
-34.8	10.09	27652	1.2	5.0	10.04	7087.3	19.6
	3.01	27065	1.2		3.02	5328.0	23.2
	1.00	26487	1.8		1.00	3939.3	27.0
	0.30	25866	2.2		0.30	2679.9	31.1
	0.10	25316	2.7		0.10	1817.1	34.9
	0.03	24356	3.3		0.03	1136.5	39.0
	0.01	23309	4.0		0.01	707.3	42.2
-24.8	9.99	25381	2.6	14.9	10.08	3058.5	31.5
	3.01	24124	3.2		3.03	1940.7	36.2
	1.00	23240	3.8		1.00	1222.6	40.0
	0.30	21991	4.5		0.30	709.4	43.4
	0.10	20561	5.6		0.10	419.9	46.3
	0.03	19100	6.5		0.03	235.7	48.0
	0.01	17543	7.7		0.01	138.0	48.1
-14.9	10.07	20610	5.5	24.9	10.04	1012.7	44.0
	3.02	18891	6.7		3.01	564.3	46.8
	1.00	17368	7.4		1.00	320.7	48.6
	0.30	15688	8.9		0.30	173.4	48.3
	0.10	13911	10.3		0.10	103.0	46.7
	0.03	12007	12.5		0.03	61.8	43.7
	0.01	10267	14.8		0.01	41.5	40.9
-5.0	10.06	14148	10.9	34.8	10.09	339.3	49.7
	3.01	12149	12.7		3.01	187.3	48.0
	1.00	10350	14.9		1.00	112.9	44.4
	0.30	8421	17.8		0.30	73.0	38.6
	0.10	6732	20.8		0.10	53.4	34.4
	0.03	5102	24.1		0.03	40.4	29.4
	0.01	3749	28.4		0.01	33.7	25.1
2S2P1D (T _{ref} : 10°C)							
E00 (MPa): 19 E0 (MPa): 29500 k: 0.188 h: 0.520 δ : 2.200 β : 175 C1: 23.11 C2: 163.66							
Temperature (°C)		-34.8	-24.8	-14.9	-5.0	5.0	10.0
Tau		1.61E+06	1.15E+04	5.00E+01	7.50E-01	5.00E-03	3.15E-03
Temperature (°C)		10.0	14.9	24.9	34.79		
Tau		3.15E-03	8.70E-04	4.60E-05	6.00E-06		

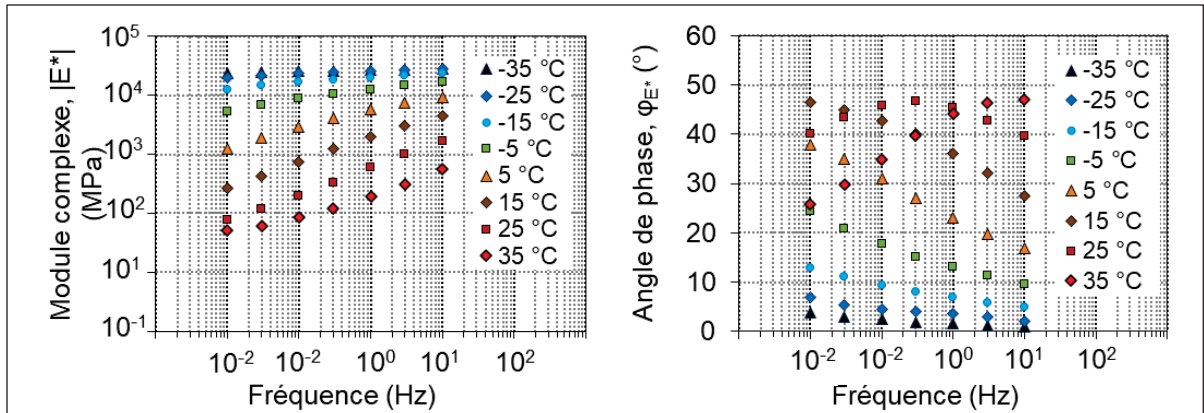
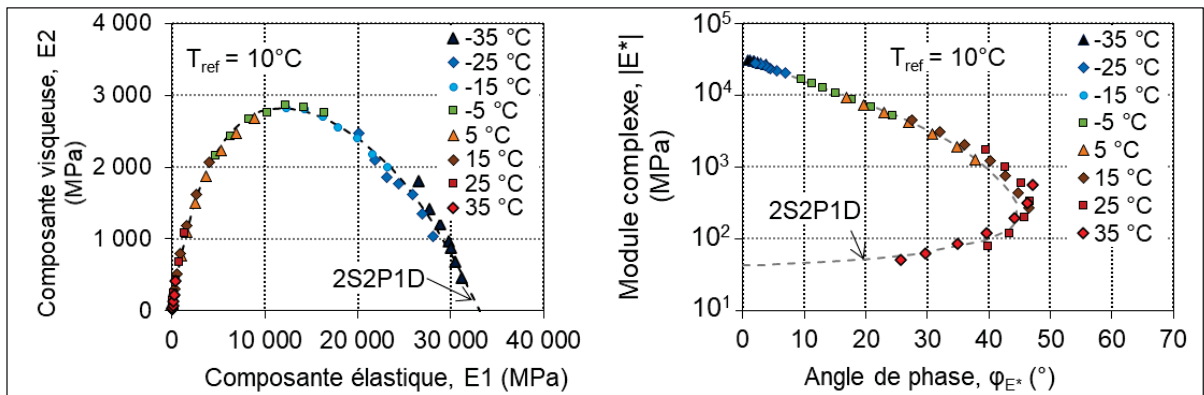
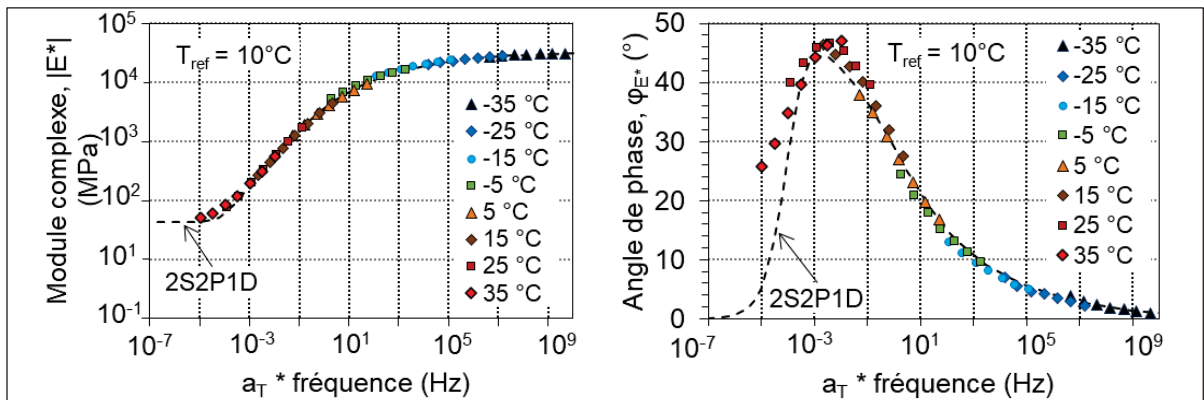
Figure A VII.59 Courbes isothermes MUN-10 R30_{FM}Figure A VII.60 Plans Cole-Cole et black MUN-10 R30_{FM}Figure A VII.61 Courbes maîtresses MUN-10 R30_{FM}

Tableau A VII.155 MUN-10 R30_{FM}

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)	Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)
-34.8	0.01	26616	3.9	5.0	0.01	1245.2	37.9
	0.03	27773	2.9		0.03	1916.9	34.9
	0.10	28851	2.4		0.10	2913.6	30.9
	0.30	29756	1.9		0.30	4129.3	27.0
	1.00	30035	1.7		1.00	5696.1	23.0
	3.01	30530	1.3		3.00	7320.7	19.7
	10.07	31206	0.9		10.03	9272.1	16.8
-24.8	0.01	20315	7.0	14.9	0.01	265.5	46.5
	0.03	21957	5.5		0.03	435.7	44.8
	0.10	23251	4.6		0.10	760.6	42.8
	0.30	24500	4.1		0.30	1239.3	40.2
	1.00	25937	3.6		1.00	2028.1	36.0
	3.01	26938	2.9		3.01	3047.7	32.0
	10.09	28183	2.1		9.98	4475.8	27.6
-14.9	0.01	12681	12.9	24.9	0.01	77.5	40.0
	0.03	14545	11.1		0.03	117.1	43.3
	0.10	16489	9.4		0.10	196.1	45.8
	0.30	18140	8.1		0.30	333.0	46.6
	1.00	20119	6.8		1.00	596.8	45.4
	3.01	21735	5.7		3.01	990.4	42.7
	10.05	23363	4.9		10.04	1690.3	39.5
-4.9	0.01	5214	24.4	34.8	0.01	51.1	25.7
	0.03	6811	20.9		0.03	61.6	29.7
	0.10	8697	17.8		0.10	84.9	34.9
	0.30	10584	15.1		0.30	120.3	39.7
	1.00	12592	13.1		1.00	193.9	44.2
	3.01	14516	11.3		3.00	315.5	46.3
	10.02	16624	9.6		10.13	566.2	47.1
2S2P1D (T _{ref} : 10°C)							
E00 (MPa): 43	E0 (MPa): 33100	k: 0.179	h: 0.510	δ: 2.280	β: 300	C1: 22.1	C2: 159.1
Temperature (°C)	-34.8	-24.8	-14.9	-4.9	5.0		
Tau	3.50E+06	3.50E+04	2.50E+02	2.50E+00	4.00E-02		
Temperature (°C)	10.0	14.9	24.9	34.82			
Tau	7.67E-03	1.50E-03	1.00E-04	8.00E-06			

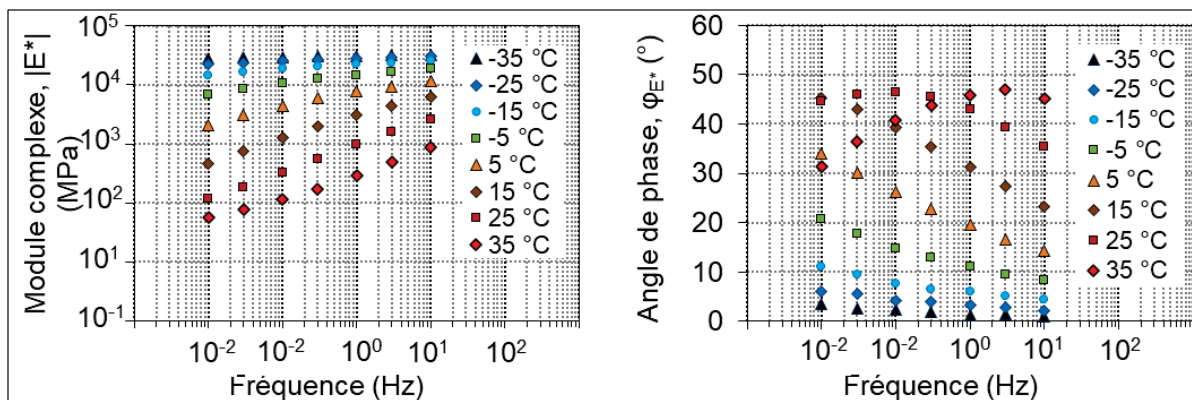
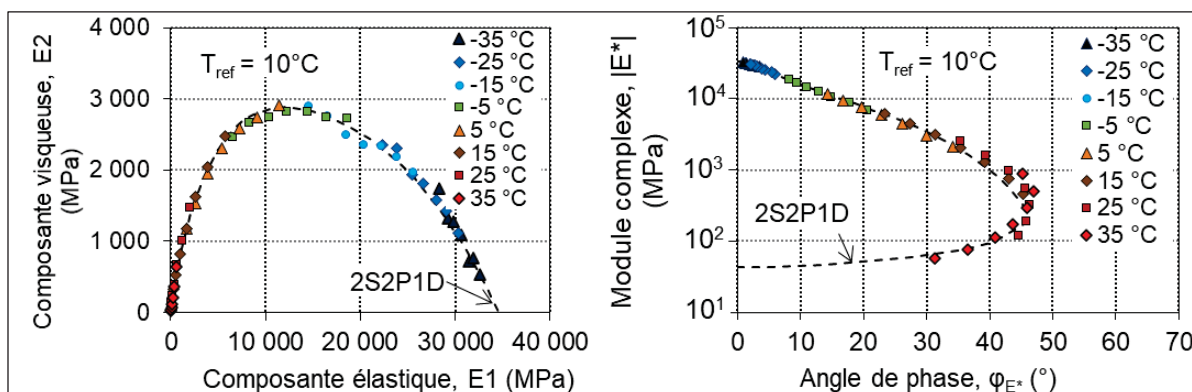
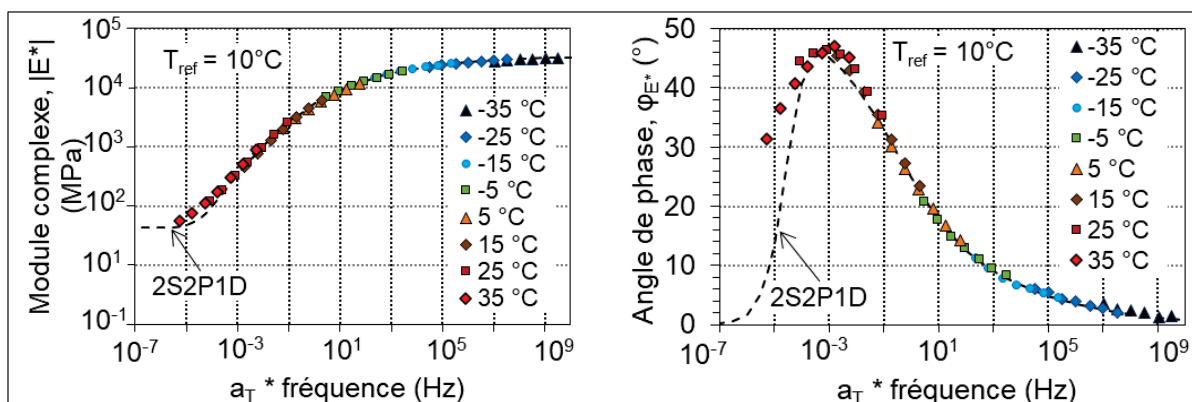
Figure A VII.62 Courbes isothermes MUN-10 R45_{FM}Figure A VII.63 Plans Cole-Cole et black MUN-10 R45_{FM}Figure A VII.64 Courbes maîtresses MUN-10 R45_{FM}

Tableau A VII.156 MUN-10 R45_{FM}

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)	Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)
-34.7	10.03	32604	0.9	5.0	10.12	11794.7	14.3
	3.01	31951	1.4		3.02	9549.3	16.7
	1.00	31491	1.3		1.00	7706.4	19.7
	0.30	30599	2.0		0.30	5926.2	22.8
	0.10	29877	2.4		0.10	4406.5	26.3
	0.03	29218	2.6		0.03	3051.9	30.1
	0.01	28396	3.5		0.01	2090.1	34.1
-24.7	9.99	30388	2.1	14.9	10.06	6229.8	23.4
	3.01	29059	2.8		3.02	4448.9	27.3
	1.00	28032	3.2		1.00	3138.9	31.3
	0.30	26653	3.9		0.30	2026.1	35.4
	0.10	25502	4.3		0.10	1295.6	39.3
	0.03	24004	5.5		0.03	765.8	43.0
	0.01	22442	6.0		0.01	466.0	45.4
-14.9	10.07	25627	4.4	24.9	10.05	2552.5	35.3
	3.01	23921	5.2		3.02	1585.5	39.4
	1.00	22377	6.0		1.00	972.3	43.1
	0.30	20511	6.6		0.30	551.2	45.6
	0.10	18634	7.7		0.10	325.0	46.4
	0.03	16791	9.5		0.03	185.5	45.9
	0.01	14856	11.2		0.01	117.1	44.5
-5.0	10.05	18855	8.3	34.8	10.00	899.2	45.2
	3.00	16646	9.5		3.00	503.3	47.0
	1.00	14700	11.0		1.00	298.6	45.9
	0.30	12606	12.9		0.30	175.2	43.7
	0.10	10706	14.9		0.10	113.2	40.8
	0.03	8718	17.7		0.03	76.1	36.5
	0.01	6989	20.7		0.01	56.9	31.4
2S2P1D (T _{ref} : 10°C)							
E00 (MPa): 43 E0 (MPa): 34600 k: 0.175 h: 0.510 δ: 2.300 β: 275 C1: 26.3 C2: 175.2							
Temperature (°C)	-34.7	-24.7	-14.9	-5.0	5.0		
Tau	1.05E+07	7.50E+04	6.50E+02	8.00E+00	1.50E-01		
Temperature (°C)	10.0	14.9	24.9	34.80			
Tau	2.48E-02	4.80E-03	2.80E-04	2.40E-05			

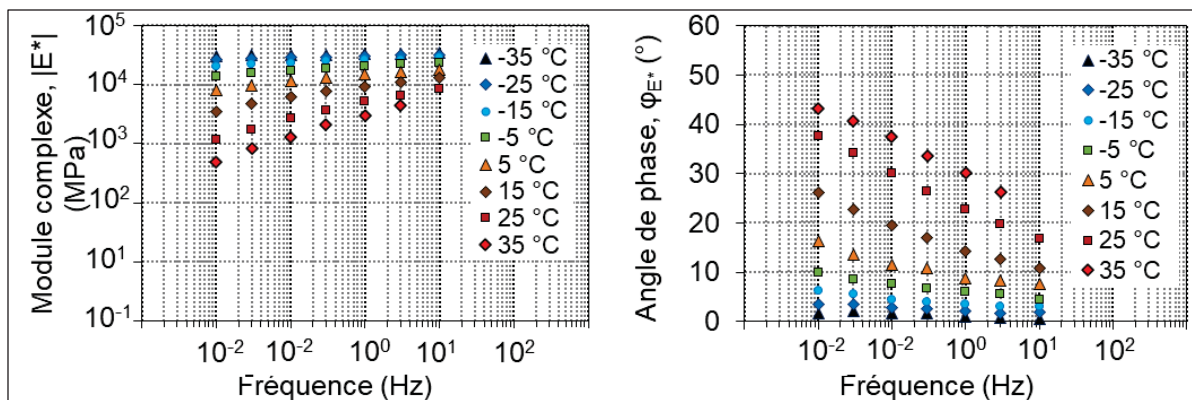
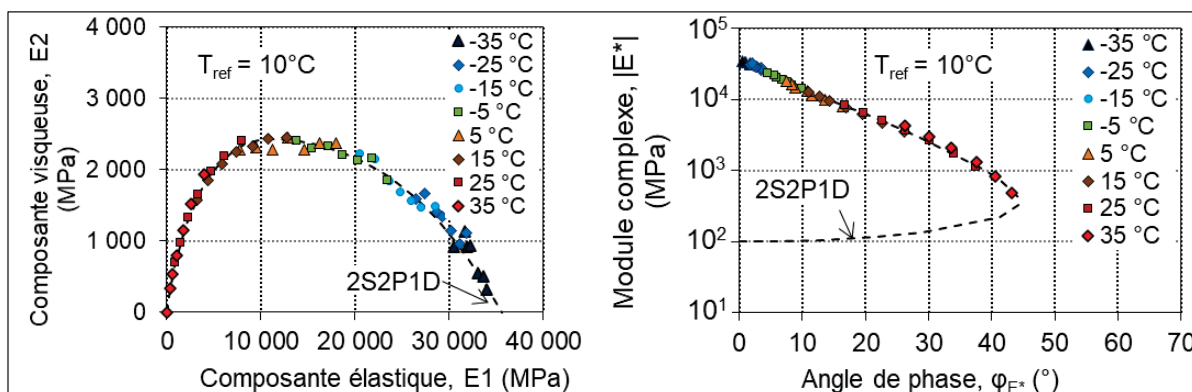
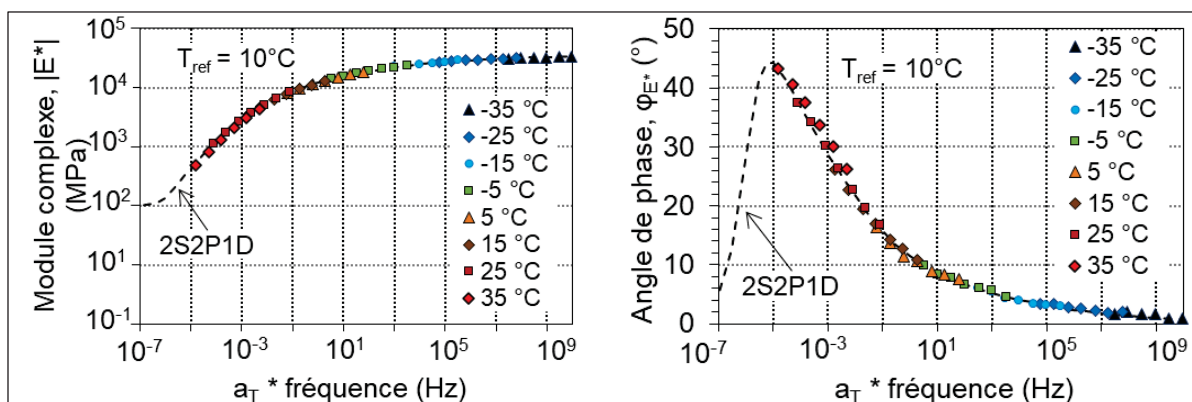
Figure A VII.65 Courbes isothermes MUN-10 R100_{FM}Figure A VII.66 Plans Cole-Cole et black MUN-10 R100_{FM}Figure A VII.67 Courbes maîtresses MUN-10 R100_{FM}

Tableau A VII.157 MUN-10 R100_{FM}

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)	Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)
-35.1	0.01	30553	1.7	5.0	0.01	8101.7	16.4
	0.03	31663	2.0		0.03	9784.8	13.6
	0.10	31897	1.6		0.10	11519.4	11.4
	0.30	32207	1.7		0.30	13116.0	10.7
	1.00	32995	1.0		1.00	14766.2	8.9
	3.00	33594	0.9		3.00	16423.7	8.3
	10.01	33984	0.5		10.08	18194.1	7.5
-25.0	0.01	26466	3.4	15.0	0.01	3543.7	26.2
	0.03	27434	3.5		0.03	4773.5	22.7
	0.10	28670	2.8		0.10	6239.2	19.4
	0.30	29337	2.6		0.30	7717.3	17.0
	1.00	30271	2.2		1.00	9407.4	14.3
	3.00	31162	1.8		2.99	11062.4	12.7
	9.98	31791	2.0		9.99	12958.8	10.9
-15.0	0.01	20695	6.1	25.0	0.01	1140.4	37.5
	0.03	22230	5.5		0.03	1735.6	34.1
	0.10	23731	4.4		0.10	2631.5	30.1
	0.30	24950	3.9		0.30	3703.7	26.3
	1.00	26024	3.4		1.00	5084.3	22.7
	3.00	27080	3.1		2.99	6495.9	19.7
	10.03	28641	3.0		9.96	8316.1	16.7
-5.0	0.01	13949	9.9	35.0	0.03	483.5	43.2
	0.03	15646	8.4		0.10	816.7	40.6
	0.10	17330	7.7		0.30	1300.0	37.5
	0.30	18864	6.7		1.00	2075.6	33.6
	1.00	20442	6.0		2.99	3017.2	30.1
	3.00	21898	5.6		10.06	4363.5	26.2
	9.91	23535	4.5		0.00	0.0	0.0
2S2P1D (T _{ref} : 10°C)							
E00 (MPa): 105 E0 (MPa): 35555 k: 0.146 h: 0.460 δ : 2.400 β : 200 C1: 24.9 C2: 163.4							
Temperature (°C)	-35.1	-25.0	-15.0	-5.0	5.0		
Tau	8.00E+09	6.80E+06	6.50E+04	5.55E+02	1.30E+01		
Temperature (°C)	10.0	14.9	25.0	34.97			
Tau	2.34E+00	4.40E-01	1.70E-02	8.00E-04			

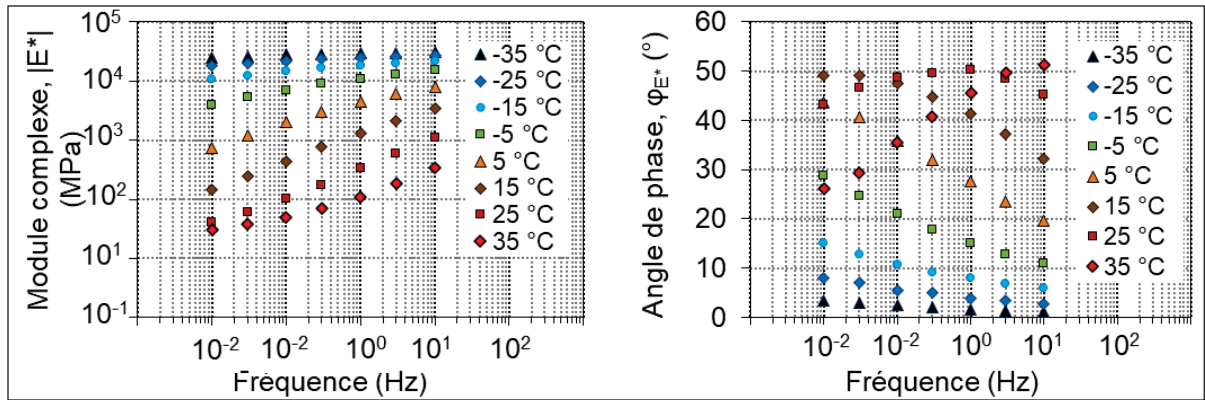
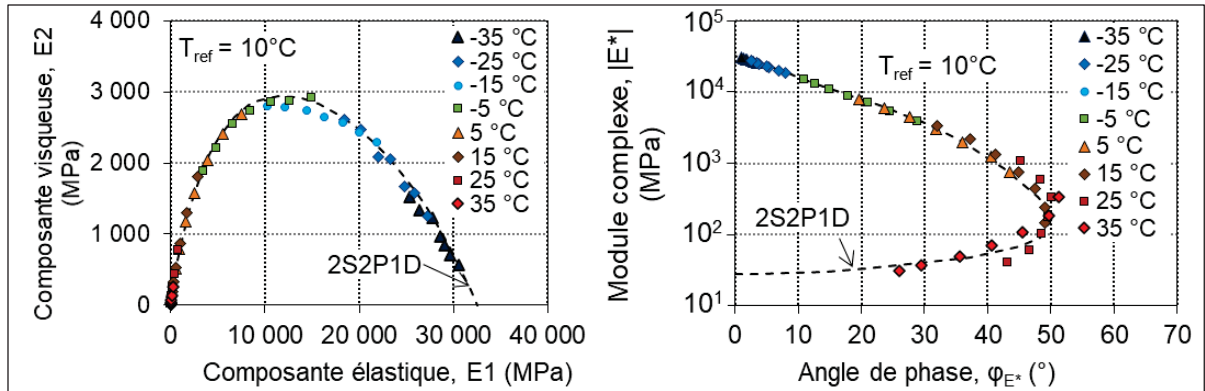
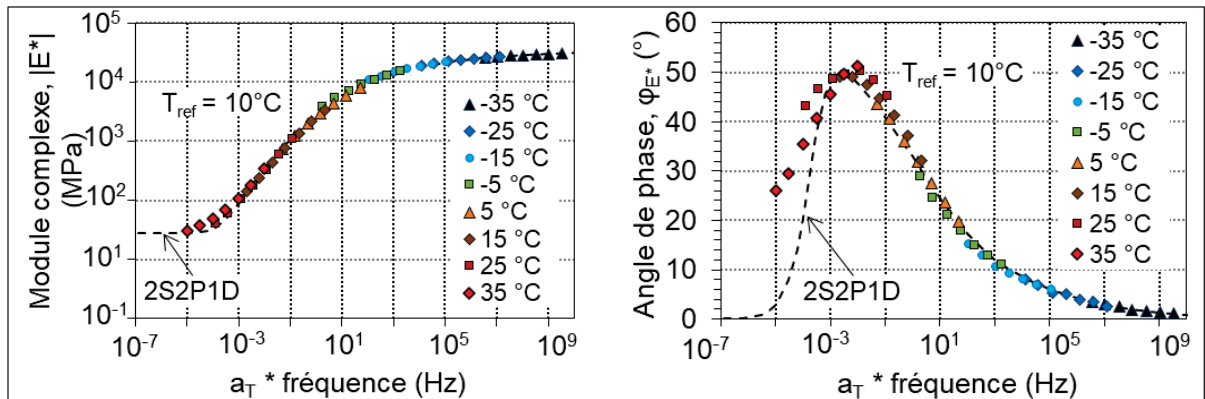
Figure A VII.68 Courbes isothermes MUN-10 R15_{60M}Figure A VII.69 Plans Cole-Cole et black MUN-10 R15_{60M}Figure A VII.70 Courbes maîtresses MUN-10 R15_{60M}

Tableau A VII.158 MUN-10 R15_{60M}

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)	Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)
-34.7	9.99	30598	1.1	5.1	10.07	7982.5	19.7
	3.01	29619	1.4		3.01	6008.9	23.6
	1.00	29092	1.7		1.00	4416.0	27.6
	0.30	28612	1.9		0.30	2991.8	31.9
	0.10	27764	2.5		0.10	1992.0	35.9
	0.03	26376	2.9		0.03	1221.4	40.6
	0.01	25366	3.5		0.01	752.3	43.5
-24.7	9.99	27298	2.6	15.0	10.04	3403.7	32.1
	3.02	25901	3.5		3.02	2156.9	37.3
	1.00	24822	3.8		1.00	1326.9	41.3
	0.30	23451	5.0		0.30	758.1	44.8
	0.10	22154	5.4		0.10	442.7	47.6
	0.03	20367	7.0		0.03	244.5	49.1
	0.01	18632	8.0		0.01	144.9	49.1
-14.8	10.08	22084	5.9	25.1	10.01	1085.5	45.2
	3.00	20234	6.9		3.01	593.3	48.4
	1.00	18498	8.0		1.00	329.6	50.2
	0.30	16540	9.2		0.30	176.2	49.6
	0.10	14764	10.6		0.10	103.0	48.6
	0.03	12535	12.8		0.03	60.2	46.6
	0.01	10679	15.2		0.01	39.8	43.2
-4.9	10.05	15262	11.0	34.9	10.03	339.5	51.2
	3.01	12970	12.8		3.01	182.2	49.7
	1.00	11004	15.0		1.00	109.1	45.5
	0.30	8920	17.8		0.30	69.2	40.7
	0.10	7097	21.1		0.10	48.7	35.5
	0.03	5307	24.6		0.03	37.4	29.4
	0.01	3890	28.9		0.01	31.1	26.0
2S2P1D (T _{ref} : 10°C)							
E00 (MPa): 28	E0 (MPa): 32555	k: 0.188	h: 0.520	δ: 2.200	β: 195	C1: 20.3	C2: 159.2
Temperature (°C)	-34.7	-24.7	-14.8	-4.9	5.1		
Tau	1.31E+06	9.50E+03	8.50E+01	1.10E+00	1.90E-02		
Temperature (°C)	10.0	15.0	25.0	34.93			
Tau	4.31E-03	8.30E-04	5.50E-05	5.50E-06			

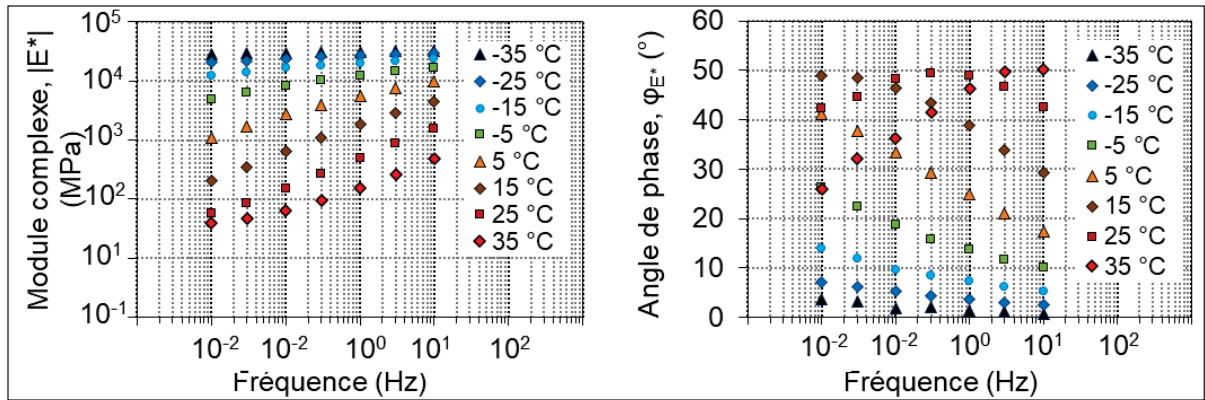
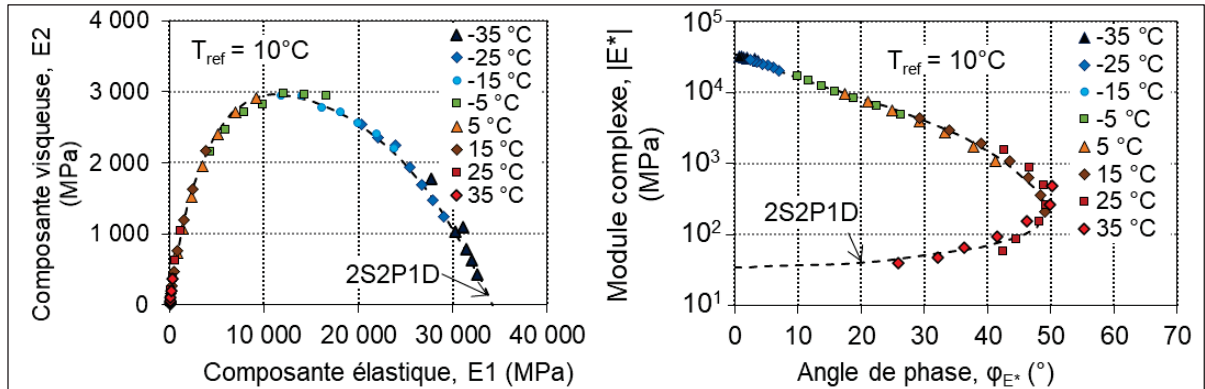
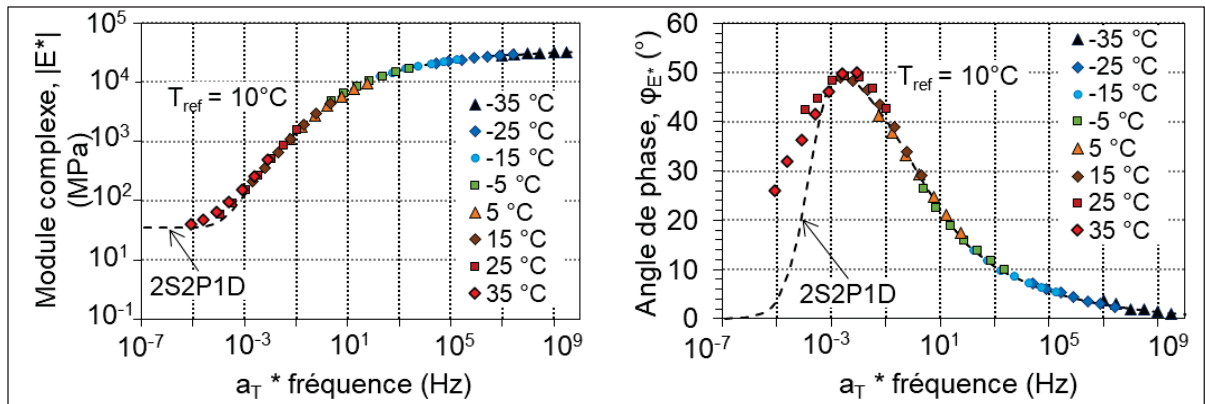
Figure A VII.71 Courbes isothermes MUN-10 R30_{60M}Figure A VII.72 Plans Cole-Cole et black MUN-10 R30_{60M}Figure A VII.73 Courbes maîtresses MUN-10 R30_{60M}

Tableau A VII.159 MUN-10 R30_{60M}

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)	Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)	
-34.9	10.04	32654	0.8	4.9	10.01	9676.4	17.5	
	3.01	32082	1.1		3.02	7528.2	21.0	
	1.00	31459	1.4		1.00	5705.0	24.8	
	0.30	31123	2.0		0.30	3990.7	29.3	
	0.10	30286	2.0		0.10	2757.9	33.3	
	0.03	29476	3.1		0.03	1741.7	37.7	
	0.01	27814	3.7		0.01	1103.6	41.2	
-24.8	10.05	29054	2.4	14.9	10.05	4434.2	29.2	
	3.01	27886	3.0		3.00	2929.7	33.9	
	1.00	26768	3.6		1.00	1889.8	39.0	
	0.30	25510	4.3		0.30	1099.0	43.5	
	0.10	24081	5.3		0.10	643.8	46.5	
	0.03	22193	6.1		0.03	356.1	48.4	
	0.01	20558	7.1		0.01	208.3	49.0	
-15.0	10.02	23900	5.3	24.9	10.07	1532.7	42.6	
	3.01	22062	6.3		3.02	862.6	46.6	
	1.00	20201	7.3		1.00	492.9	48.9	
	0.30	18284	8.5		0.30	263.3	49.3	
	0.10	16412	9.7		0.10	151.6	48.3	
	0.03	14326	11.8		0.03	87.5	44.6	
	0.01	12254	13.9		0.01	57.3	42.4	
-5.1	10.01	16864	10.0	34.8	10.08	489.6	50.1	
	3.01	14604	11.7		3.00	261.7	49.8	
	1.00	12473	13.8		1.01	154.7	46.2	
	0.30	10295	15.9		0.30	94.5	41.5	
	0.10	8379	18.9		0.10	65.3	36.3	
	0.03	6443	22.5		0.03	48.2	32.1	
	0.01	4833	26.4		0.01	39.3	25.9	
2S2P1D (T _{ref} : 10°C)								
E00 (MPa): 35		E0 (MPa): 34250	k: 0.180	h: 0.540	δ : 2.290	β : 155	C1: 22.8	C2: 158.7
Temperature (°C)		-34.9	-24.8	-15.0	-5.0	4.9		
Tau		8.00E+06	3.50E+04	2.00E+02	2.30E+00	4.50E-02		
Temperature (°C)		10.0	14.9	24.9	34.81			
Tau		8.00E-03	1.90E-03	1.30E-04	1.20E-05			

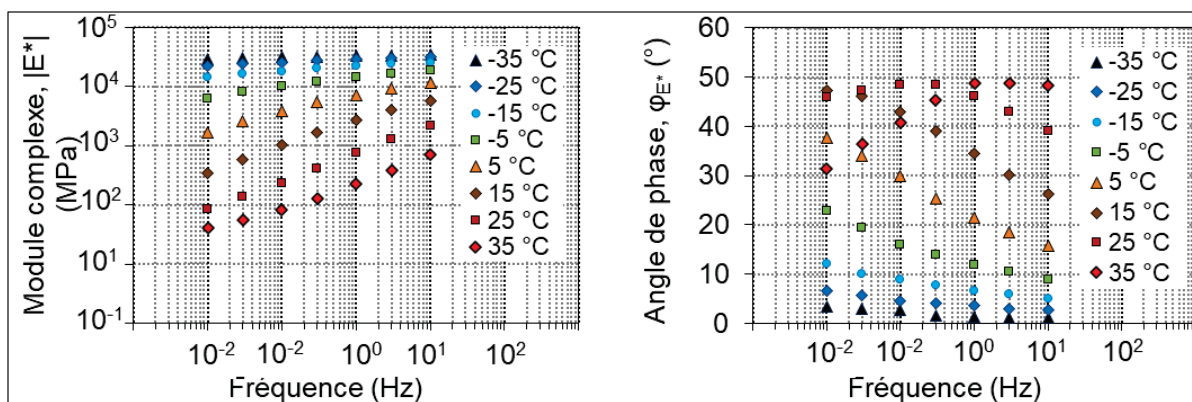
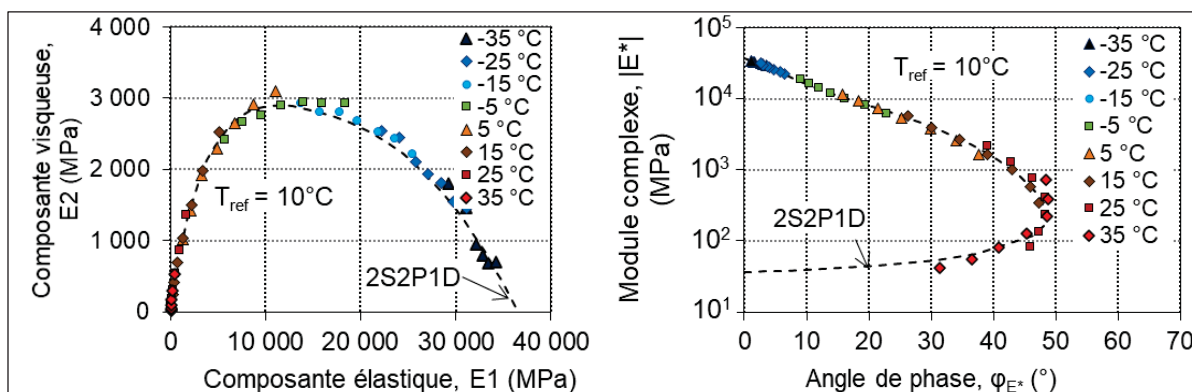
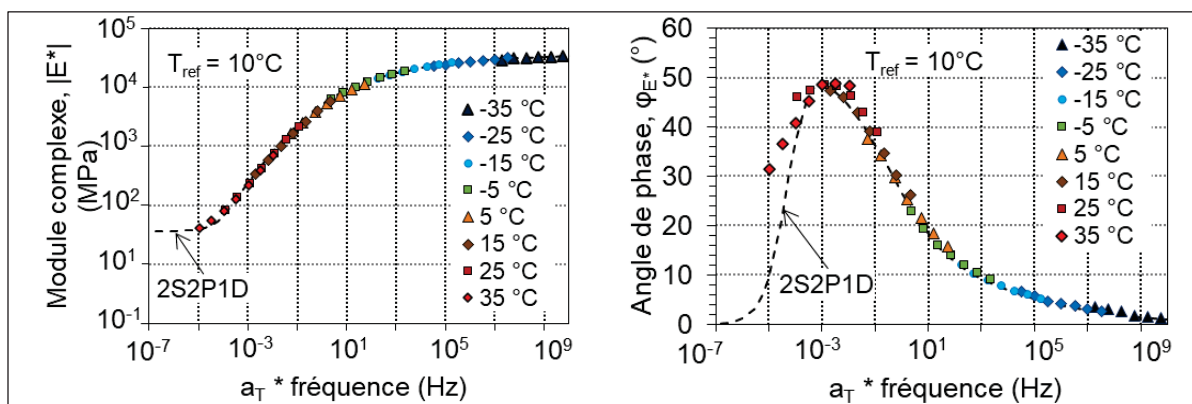
Figure A VII.74 Courbes isotherme MUN-10 R45_{60M}Figure A VII.75 Plan Cole-Cole et black MUN-10 R45_{60M}Figure A VII.76 Courbes maitresses MUN-10 R45_{60M}

Tableau A VII.160 MUN-10 R45_{60M}

Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)	Température (°C)	Fréquence (Hz)	Module, E* (MPa)	Angle de phase, φ (°)
-34.8	9.99	34274	1.2	5.0	10.00	11443.7	15.7
	3.01	33434	1.2		3.02	9188.9	18.4
	1.00	32881	1.4		1.00	7216.2	21.5
	0.30	32149	1.7		0.30	5371.3	25.3
	0.10	31089	2.7		0.10	3848.5	29.8
	0.03	30643	3.0		0.03	2545.0	34.1
	0.01	29246	3.5		0.01	1658.5	37.6
-24.7	10.19	31192	2.7	14.9	10.06	5699.9	26.2
	3.01	29772	3.0		3.02	3936.1	30.1
	1.00	28544	3.6		1.00	2655.0	34.6
	0.30	27168	4.1		0.30	1650.4	39.1
	0.10	25851	4.7		0.10	1016.6	43.0
	0.03	24137	5.8		0.03	574.2	46.0
	0.01	22404	6.5		0.01	340.1	47.2
-14.9	10.07	25615	5.0	24.9	10.06	2157.7	39.0
	3.01	23755	5.9		3.01	1277.6	42.9
	1.00	21977	6.6		1.00	752.2	46.2
	0.30	19880	7.7		0.30	408.5	48.3
	0.10	18032	8.9		0.10	235.7	48.4
	0.03	15962	10.1		0.03	134.0	47.3
	0.01	14029	12.1		0.01	83.0	46.0
-5.0	10.03	18636	9.0	34.8	10.05	715.2	48.4
	3.02	16218	10.4		3.02	385.1	48.8
	1.00	14225	12.0		1.01	222.5	48.7
	0.30	12024	13.9		0.30	126.1	45.3
	0.10	9989	16.1		0.10	81.3	40.8
	0.03	8015	19.4		0.03	55.3	36.5
	0.01	6193	22.9		0.01	41.2	31.4
2S2P1D (T _{ref} : 10°C)							
E00 (MPa): 37	E0 (MPa): 37000	k: 0.169	h: 0.540	δ: 2.450	β: 195	C1: 19.9	C2: 140.7
Temperature (°C)	-34.8	-24.7	-14.9	-5.0	5.0		
Tau	2.25E+07	7.50E+04	4.75E+02	5.00E+00	1.10E-01		
Temperature (°C)	10.0	14.9	24.9	34.80			
Tau	2.01E-02	3.90E-03	2.50E-04	2.50E-05			

Tableau A VII. 161 Résultats TSRST MUN-10 R0

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
MUN-10 R0 (1)	-34.2	2592	6138	2368	Rupture partie supérieure
MUN-10 R0 (2)	-32.0	2574	5464	2123	Rupture partie supérieure
MUN-10 R0 (3)	-28.8	2605	3175	1219	Rupture partie supérieure
MOY	-31.7	2590	4926	1903	N/A

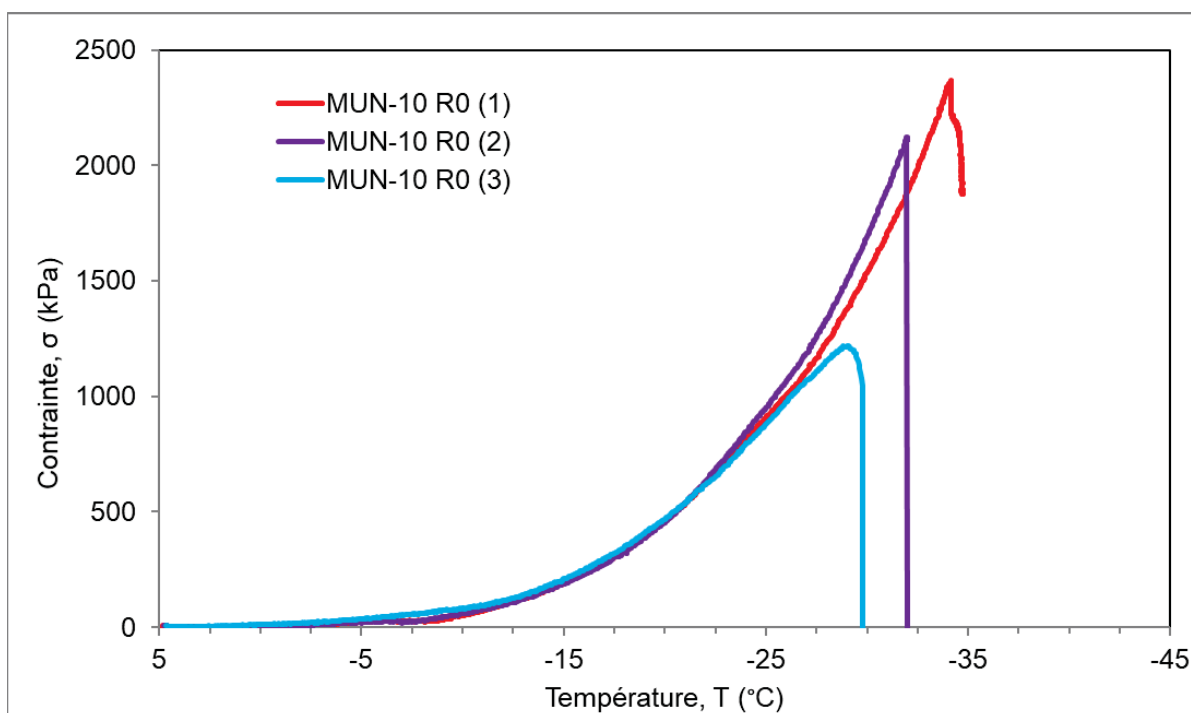


Figure A VII.77 Résultats TSRST MUN-10 R0

Tableau A VII.162 Résultats TSRST MUN-10 R15_{FM}

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
MUN-10 R15 _{FM} (1)	-34.3	2584	6580	2546	Rupture partie supérieure
MUN-10 R15 _{FM} (2)	-34.4	2572	4883	1899	Rupture partie supérieure
MUN-10 R15 _{FM} (3)	-34.8	2601	7290	2803	Rupture partie supérieure
MOY	-34.5	2586	6251	2416	N/A

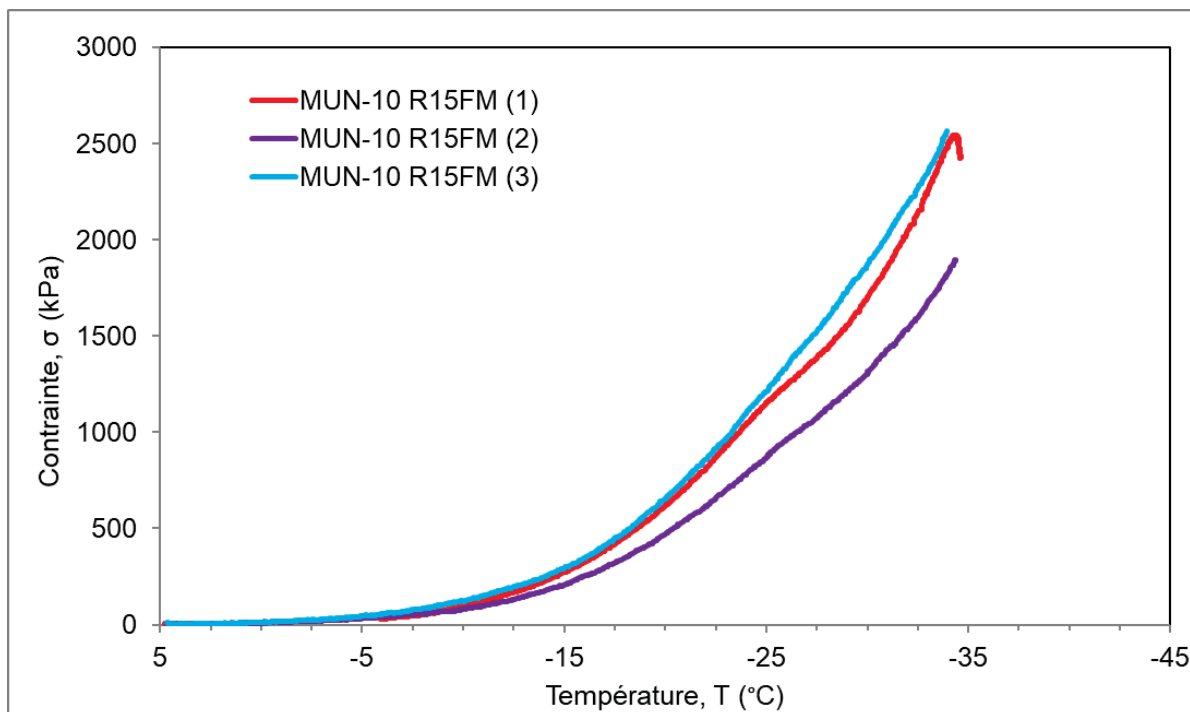
Figure A VII.78 Résultats TSRST MUN-10 R15_{FM}

Tableau A VII.163 Résultats TSRST MUN-10 R30_{FM}

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
MUN-10 R30 _{FM} (1)	-34.0	2584	7726	2990	Rupture partie supérieure
MUN-10 R30 _{FM} (2)	-34.5	2572	6934	2696	Rupture partie supérieure
MUN-10 R30 _{FM} (3)	-28.6	2601	8229	3164	Rupture partie supérieure
MOY	-32.3	2586	7630	2950	N/A

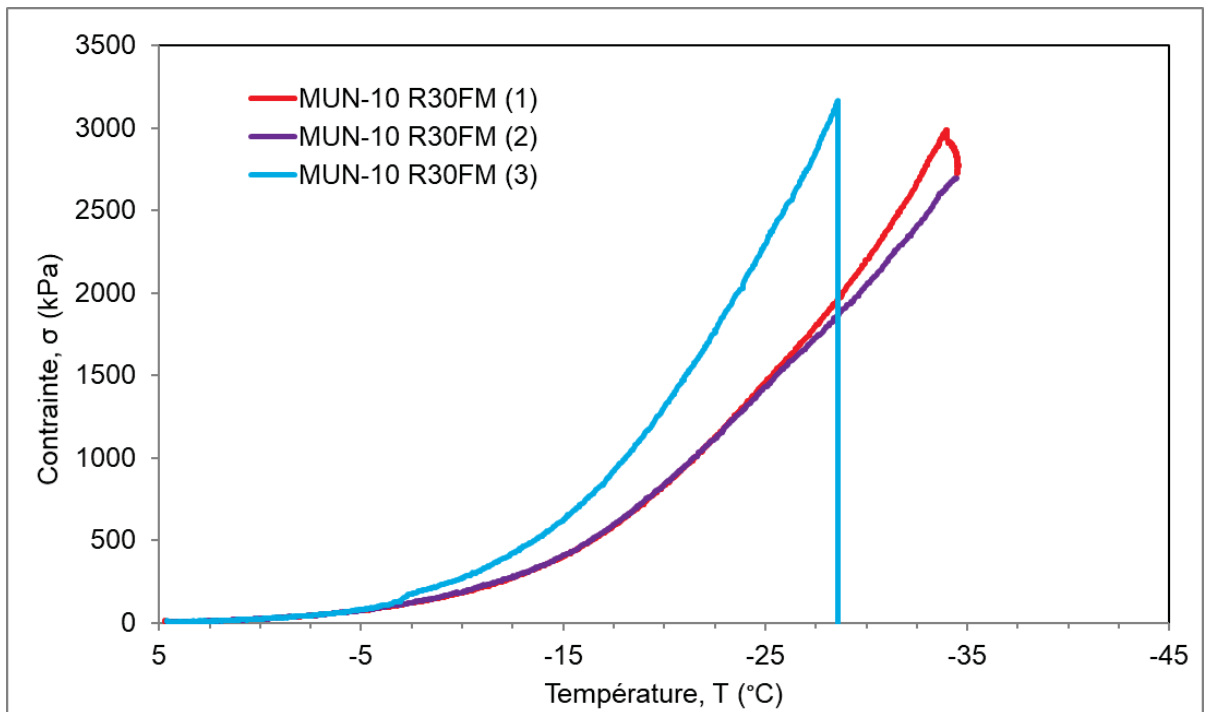
Figure A VII.79 Résultats TSRST MUN-10 R30_{FM}

Tableau A VII.164 Résultats TSRST MUN-10 R45_{FM}

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
MUN-10 R45 _{FM} (1)	-25.3	2592	10924	4215	Rupture partie supérieure
MUN-10 R45 _{FM} (2)	-34.0	2581	8494	3291	Rupture partie supérieure
MUN-10 R45 _{FM} (3)	-33.7	2599	8619	3316	Rupture partie supérieure
MOY	-31.0	2591	9346	3607	N/A

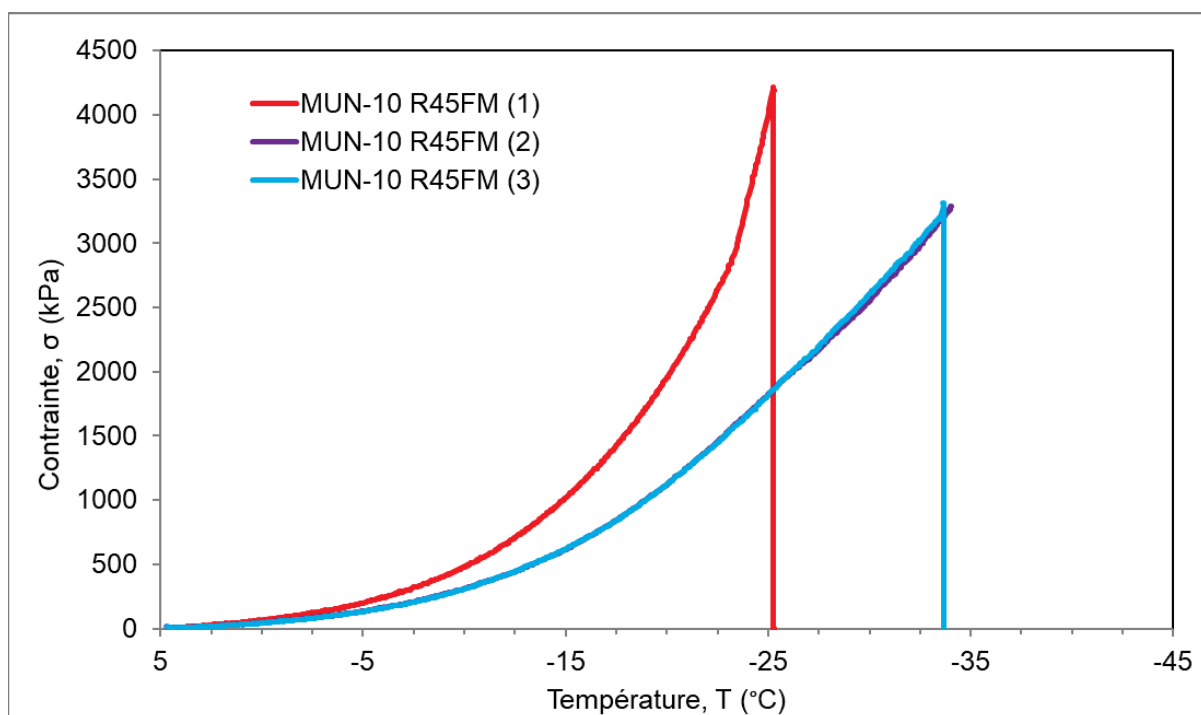
Figure A VII.80 Résultats TSRST MUN-10 R45_{FM}

Tableau A VII.165 Résultats TSRST MUN-10 R100_{FM}

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
MUN-10 R100 _{FM} (1)	-17.7	2581	6227	2413	Rupture partie supérieure
MUN-10 R100 _{FM} (2)	-17.3	2587	6283	2429	Rupture partie supérieure
MUN-10 R100 _{FM} (3)	-15.7	2585	5561	2151	Rupture partie supérieure
MOY	-16.9	2584	6024	2331	N/A

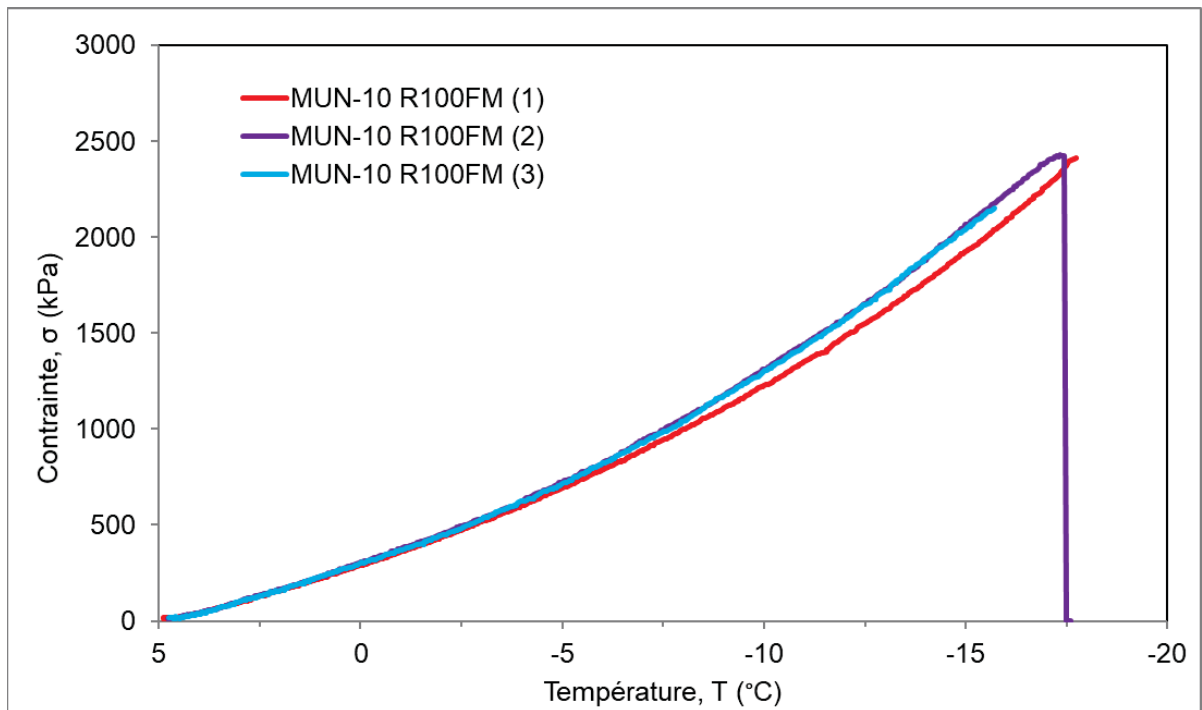
Figure A VII.81 Résultats TSRST MUN-10 R100_{FM}

Tableau A VII.166 Résultats TSRST MUN-10 R15_{60M}

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
MUN-10 R15 _{60M} (1)	-32.1	2584	7985	3090	Rupture partie supérieure
MUN-10 R15 _{60M} (2)	-32.8	2591	9917	3827	Rupture partie supérieure
MUN-10 R15 _{60M} (3)	-35.3	2581	6758	2618	Rupture partie supérieure
MOY	-33.4	2585	8220	3179	N/A

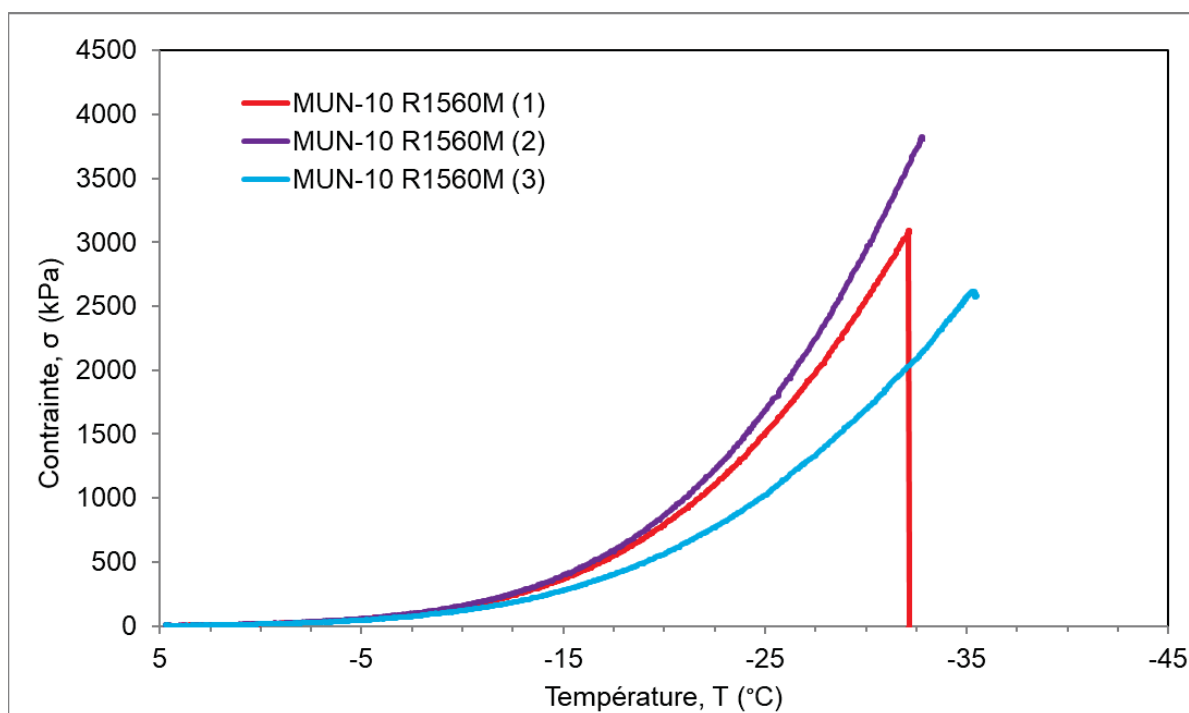
Figure A VII.82 Résultats TSRST MUN-10 R15_{60M}

Tableau A VII.167 Résultats TSRST MUN-10 R30_{60M}

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
MUN-10 R30 _{60M} (1)	-35.0	2586	7703	2979	Rupture partie supérieure
MUN-10 R30 _{60M} (2)	-32.9	2584	8163	3159	Rupture partie supérieure
MUN-10 R30 _{60M} (3)	-33.7	2591	9765	3769	Rupture partie supérieure
MOY	-33.9	2587	8543	3302	N/A

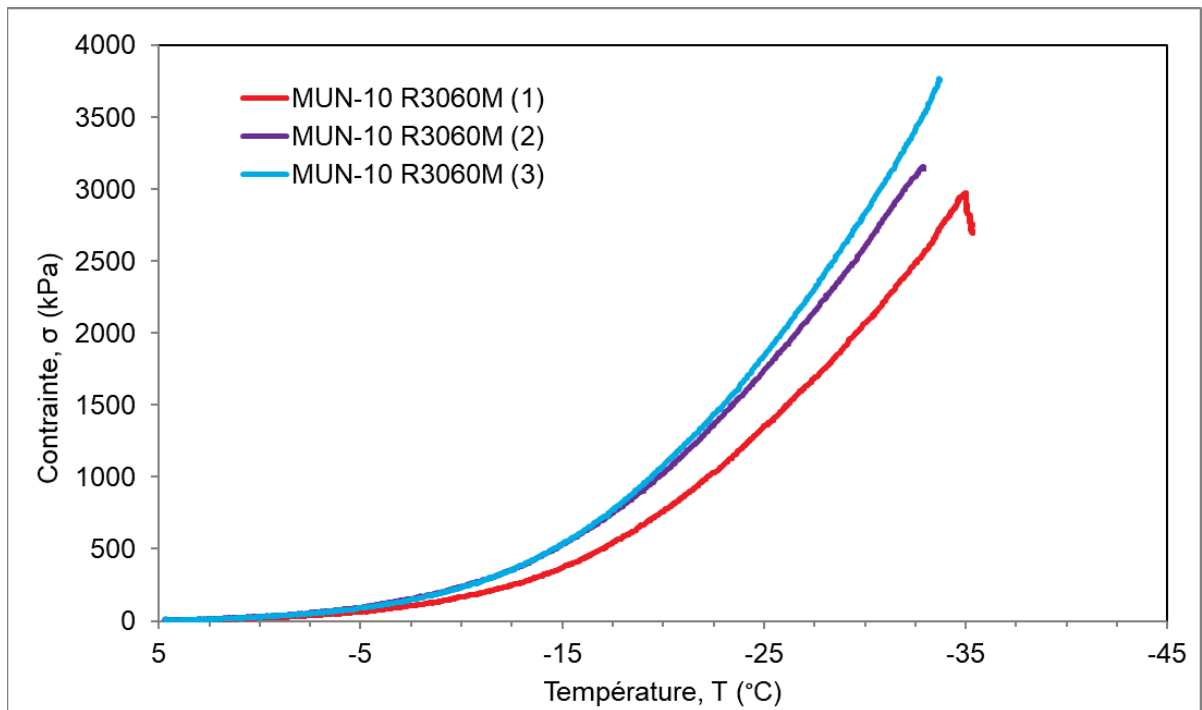
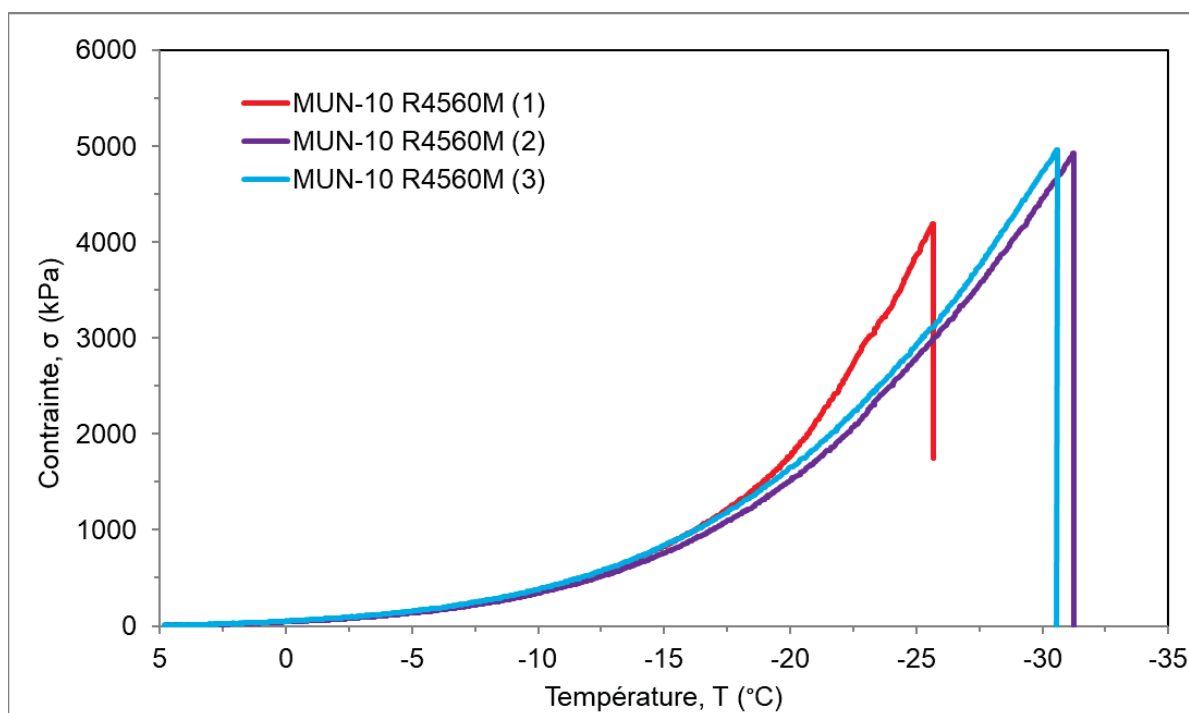
Figure A VII.83 Résultats TSRST MUN-10 R30_{60M}

Tableau A VII.168 Résultats TSRST MUN-10 R45_{60M}

#	Température rupture (°C)	Surface (mm ²)	Force rupture (N)	Contrainte rupture (kPa)	Remarques
MUN-10 R45 _{60M} (1)	-25.7	2586	10842	4192	Rupture partie supérieure
MUN-10 R45 _{60M} (2)	-31.2	2584	12745	4932	Rupture partie supérieure
MUN-10 R45 _{60M} (3)	-30.6	2591	12860	4963	Rupture partie supérieure
MOY	-29.2	2587	12149	4696	N/A

Figure A VII.84 Résultats TSRST MUN-10 R45_{60M}

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AASHTO. (2019). Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). AASHTO T-350-19. Washington (DC): American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2022a). Determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR). AASHTO T315-22. Washington (DC): American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2022b). Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). AASHTO TP313- 22. Washington (DC): American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2023). Standard specification for performance-graded asphalt binder. AASHTO M320-23. Washington (DC): American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abdelaziz, A., Martin, A. E., Mercado, E. A., & Sobieski, T. (2021). Study of the quantification of recycled binder activity in asphalt mixtures with RAP. *Construction and Building Materials*, 309, 125189.
- Airey, G. D., Choi, Y. K., Collop, A. C., & Elliott, R. (2004). Rheological and fracture characteristics of low penetration grade bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 5(sup1), 107-131.
- Al-Qadi, I. L., Aurangzeb, Q., Carpenter, S. H., Pine, W. J., & Trepanier, J. (2012). Impact of high RAP content on structural and performance properties of asphalt mixtures. *Illinois Center for Transportation*, 0197-9191.
- Anderson, R. M., King, G. N., Hanson, D. I., & Blankenship, P. B. (2011). Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 80.
- Aschenbrener, T. (1995). Investigation of low temperature thermal cracking in hot mix asphalt.
- Asphalt Institute. (1969). Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types (No. 2). Asphalt Institute.
- ASTM. (2014). *Standard Test Method for Determining the Complex Shear Modulus (G^*) Of Bituminous Mixtures Using Dynamic Shear Rheometer*. ASTM D7552-09 West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials.

- Arámbula-Mercado, E., Kaseer, F., Martin, A. E., Yin, F., & Cucalon, L. G. (2018). Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents. *Construction and Building Materials*, 158, 432-442.
- Austerman, A. J., Mogawer, W. S., & Stuart, K. D. (2020). Variability of reclaimed asphalt pavement (RAP) properties within a state and its effects on RAP specifications. *Transportation Research Record*, 2674(6), 73-84.
- Australian Asphalt Pavement Association. (2018). *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Management Plan*.
- Aurangzeb, Q., & Al-Qadi, I. L. (2014). Asphalt pavements with high reclaimed asphalt pavement content: Economic and environmental perspectives. *Transportation research record*, 2456(1), 161-169.
- Badeli, S., Solatiyan, E., Carter, A., & Eng, P. (2019). Flexible Warm Mix Asphalt for Rural Roads in Canada—Laboratory Results and Case Studies. *Canadian Technical Asphalt Association: Montreal, QC, Canada*.
- Baghaee Moghaddam, T. (2019). Development of high modulus asphalt concrete mix design technology for use on Ontario's highways.
- Basueny, A., Perraton, D., & Carter, A. (2014). Laboratory study of the effect of RAP conditioning on the mechanical properties of hot mix asphalt containing RAP. *Materials and structures*, 47(9), 1425-1450.
- Baumgardner, G. (2020). Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) Implementation and Transition.
- Baumgardner, G. (2021). *Delta Tc Binder Specification Parameter [tech brief]* (No. FHWA-HIF-21-042). United States. Federal Highway Administration. Office of Preconstruction, Construction, and Pavements.
- Behera, P. K., Singh, A. K., & Amaranatha Reddy, M. (2013). An alternative method for short- and long-term ageing for bitumen binders. *Road materials and pavement design*, 14(2), 445-457.
- Berthomieu, C., & Hienerwadel, R. (2009). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Photosynthesis research*, 101, 157-170.
- Bérubé, M. A., Lamothe, S., Bilodeau, K., & Carter, A. (2023). Laboratory study of the effects of the mixer type and mixing time on the volumetric properties and performance of a HMA with 30 percent Reclaimed Asphalt Pavement. *Materials*, 16(3), 1300.

- Bérubé, M. A., Lamothe, S., Bilodeau, K., Orozco, G., & Carter, A. (2024). Physical, rheological, and infrared absorbance properties of several sources of Reclaimed Asphalt Pavement from the same area in Montreal region, Canada. *Road Materials and Pavement Design*.
- Bilodeau, K. (2012). *Comportement thermomécanique des matériaux traités au liant hydraulique et des bétons compactés routiers incluant des fraisâts bitumineux et des fibres métalliques* (Doctoral dissertation, Ph. D. Thèse de doctorat, ENTPE, Vaulx-en-Velin Cedex, France (in French)).
- Bureau de Normalisation du Québec. (2014). *Travaux de génie civil-Granulats - Partie I : Définitions, classification et désignation. Norme BNQ 2560-114/2014*. Québec, QC : Bureau de Normalisation du Québec.
- Boriack, P. C. (2014). *A laboratory study on the effect of high RAP and high asphalt binder content on the performance of asphalt concrete* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Bražiūnas, J., Sivilevičius, H., & Virbickas, R. (2013). Dependences of SMA mixture and its bituminous binder properties on bitumen batching system, mixing time and temperature on asphalt mixing plant. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(6), 862-872.
- BRIC. (2016). *Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes*, Retrieved from the Canadian infrastructure website.
- Brown, S. F., Rowlett, R. D., & Boucher, J. L. (1991). Asphalt modification. In *Highway research: sharing the benefits* (pp. 181-203). Thomas Telford Publishing.
- Cardone, F., Ferrotti, G., Frigio, F., & Canestrari, F. (2014). Influence of polymer modification on asphalt binder dynamic and steady flow viscosities. *Construction and Building Materials*, 71, 435-443.
- Carret, J. C., Di Benedetto, H., & Sauzeat, C. (2020). Linear viscoelastic behavior of asphalt mixes from dynamic frequency response functions. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 44(7), 1019-1031.
- Carter, A. (2005). *Development of A Non-Solvent Based Test Method for Evaluating Reclaimed Asphalt Pavement Mixes* (Thèse de doctorat, Université d'Auburn).
- Carter, A. (2018) Reconnaître les types de dégradation des chaussées municipales. Via bitume Quebec
- Carter A., Donovan H., MacInnis K. et Strynadka T. (2018). Hot Mix Asphalt, Canadian Technical Asphalt Association, CTAA, 1st Edition.

- Chattaraj, R. (2011). Bitumen Grading system—from penetration grading to viscosity grading—A step towards better quality control. *Indian Highways*, 39(2).
- Chen, Q., & Li, Y. (2013). SGC tests for influence of material composition on compaction characteristic of asphalt mixtures. *The Scientific World Journal*, 2013.
- Chesner, W. H., Collins, R. J., MacKay, M. H., & Emery, J. (2002). *User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction* (No. FHWA-RD-97-148, Guideline Manual, Rept No. 480017). Recycled Materials Resource Center.
- Chow, J., Badra, M. (2018). *Recycled Asphalt Pavement (RAP) Scoping Study: Recycled Asphalt Pavement Toolkit; Final Report*, Metro Vancouver; National Zero Waste Council: Vancouver, BC, Canada, 2018.
- Chowdhury, P. S., Noojilla, S. L. A., & Reddy, M. A. (2022). Evaluation of fatigue characteristics of asphalt mixtures using Cracking Tolerance index (CT_{Index}). *Construction and Building Materials*, 342, 128030.
- Cominsky, R. J., Huber, G. A., Kennedy, T. W., & Anderson, M. (1994). *The superpave mix design manual for new construction and overlays* (No. SHRP-A-407). Washington, DC: Strategic Highway Research Program.
- Corte, J. F. (2001). Development and uses of hard-grade asphalt and of high-modulus asphalt mixes in France. *Transportation Research Circular*, 503, 12-31.
- D'Angelo, J. A. (2009). The relationship of the MSCR test to rutting. *Road Materials and Pavement Design*, 10(sup1), 61-80.
- Daly, W. H., Negulescu, I. I., & Balamurugan, S. S. (2019). *Chemical characterization of asphalts related to their performance* (No. FHWA/LA. 15/560, LTRC Project). Louisiana. Department of Transportation and Development.
- Delorme, J. L., De La Roche, C., & Wendling, L. (2007). Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*.
- Denneman, E., Nkgapele, M., Anochie-Boateng, J., & Maina, J. W. (2011). Transfer of high modulus asphalt mix technology to South Africa. In *Proceedings of the 10th conference on asphalt pavements for Southern Africa, Champagne Sports Resort*.
- Di Benedetto, H., & Corté, J. F. (2005). Matériaux Routiers Bitumineux 2: Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges. hermes. *Coll.«Mécanique et Ingénierie des Matériaux»*. Paris: Hermes Science.

- Di Benedetto, H., Delaporte, B., & Sauzéat, C. (2007). Three-dimensional linear behavior of bituminous materials: experiments and modeling. *International Journal of Geomechanics*, 7(2), 149-157.
- Di Benedetto, H., Nguyen, Q. T., & Sauzéat, C. (2011). Nonlinearity, heating, fatigue and thixotropy during cyclic loading of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 12(1), 129-158.
- Di Benedetto, H., Sauzéat, C., & Sohm, J. (2009). Stiffness of bituminous mixtures using ultrasonic wave propagation. *Road Materials and Pavement Design*, 10(4), 789-814.
- Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J., Sangiorgi, C., Zoorob, S. E., et Afonso, M. L. (2016). Performance of warm mix recycled asphalt containing up to 100% RAP. *Construction and Building Materials*, 112, 1-6.
- Du, Y., Chen, J., Han, Z., & Liu, W. (2018). A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods. *Construction and Building Materials*, 168, 893-905.
- El Beze, L. (2008). *Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumeux: identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 3).
- El Fatimy, A. (2007). *Détection et Emission Terahertz par les ondes de plasma dans des transistors HEMT à base d'hétérostructures GAN/AlGaN et InGaAs/InAlAs* (Thèse de doctorat, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc).
- Elkashef, M., Williams, R. C., & Cochran, E. (2018). Thermal stability and evolved gas analysis of rejuvenated reclaimed asphalt pavement (RAP) bitumen using thermogravimetric analysis–Fourier transform infrared (TG–FTIR). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(2), 865-871.
- Epps, J. A., Monismith, C. L., Warden, W. B., Pell, P. S., Kallas, B. F., Terrell, R. L., ... & Mcleod, N. W. (1969). Influence of mixture variables on the flexural fatigue properties of asphalt concrete. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.*
- European Asphalt Pavement Association. (2014). *Asphalt the 100% recyclable construction product*. EAPA Position Paper, 1-21.
- Falchetto, A. C., Moon, K. H., Wang, D., Riccardi, C., & Wistuba, M. P. (2018). Comparison of low-temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations. *Road Materials and Pavement Design*, 19(3), 591-604.

- Fikke, S. M., Kristjánsson, J. E., & Kringlebotn Nygaard, B. E. (2008). Modern meteorology and atmospheric icing. In *Atmospheric Icing of Power Networks* (pp. 1-29). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Filonzi, A., Lee, S. K., Hajj, R., Hazlett, D., & Bhasin, A. (2020). *Implementing Revisions to the Allowable Maximum Recycled Binder Ratio (RBR) Specification* (No. FHWA/TX-20/0-6947-1). University of Texas at Austin. Center for Transportation Research.
- Gamarra, A., & Ossa, E. A. (2018). Thermo-oxidative aging of bitumen. *International journal of pavement engineering*, 19(7), 641-650.
- Gandi, A. (2018). *Laboratory characterization of bitumen treated full depth reclamation materials* (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- Gao, J., Yao, Y., Huang, J., Yang, J., Song, L., Xu, J., & Lu, X. (2022). Effect of Hot Mixing Duration on Blending, Performance, and Environmental Impact of Central Plant Recycled Asphalt Mixture. *Buildings*, 12(7), 1057.
- Gayte, P. (2016). *Modélisation du comportement thermo-viscoplastique des enrobés bitumineux* (Doctoral dissertation, Université de Lyon).
- Ge, D., You, Z., Chen, S., Liu, C., Gao, J., & Lv, S. (2019). The performance of asphalt binder with trichloroethylene: Improving the efficiency of using reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 232, 205-212.
- Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., Afsharikia, Z., & Khadem, M. (2012). Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 440-449.
- Group Raha. (2023). Penetration Grade Bitumen. Repéré à <https://rahaoil.com/penetration-grade-bitumen/>
- Guissi, G. (2016). TCH025: Travaux de génie civil. École de Technologie Supérieure.
- Hajj, E. Y., Morian, N., Sebaaly, P. E., Nabizadeh, H., & Pournoman, S. (2016). Evaluation of adaptive Glover-Rowe parameter on aging of select modified binders. In *Proc., 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.
- Hajj, E. Y., Sebaaly, P. E., & Shrestha, R. (2009). Laboratory evaluation of mixes containing recycled asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*, 10(3), 495-517.
- Hall, S. J. (2009). *Determining the effective PG grade of binder in RAP mixtures*. University of New Hampshire.

- Hansen, K. R., Copeland, A., & National Asphalt Pavement Association. (2013). *Annual asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2009-2012* (No. IS-138). National Asphalt Pavement Association.
- Harman, T., Youtcheff, J., & Bukowski, J. (2011). *The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure* (No. FHWA-HIF-11-038). United States. Federal Highway Administration.
- Hassan, N. A., Khan, R., Raaberg, J., & Presti, D. L. (2015). Effect of mixing time on reclaimed asphalt mixtures: An investigation by means of imaging techniques. *Construction and Building Materials*, 99, 54-61.
- He, H., Zhang, E., Fatokoun, S., & Shan, L. (2008). Effect of the softer binder on the performance of repeated RAP binder. *Construction and Building Materials*, 178, 280-287.
- Hein, K. D. & Schaus, L. (2020). *Revue et analyse comparative des enrobés*. (Rapport ARA n° 001). Québec : Ministère des Transports du Québec.
- Hettiarachchi, C., Hou, X., Xiang, Q., Yong, D., & Xiao, F. (2020). A blending efficiency model for virgin and aged binders in recycled asphalt mixtures based on blending temperature and duration. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104957.
- Hossain, Z., Zaman, M., & Ghosh, D. (2015). *Creep compliance and percent recovery of Oklahoma certified binder using the multiple stress recovery (MSCR) method* (No. FHWA-OK-14-19). Oklahoma. Dept. of Transportation. Materials and Research Division.
- Hu, Y., Si, W., Kang, X., Xue, Y., Wang, H., Parry, T., & Airey, G. D. (2022). State of the art: Multiscale evaluation of bitumen ageing behaviour. *Fuel*, 326, 125045.
- Huang, B., Shu, X., et Vukosavljevic, D. (2011). Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1535-1543.
- Hugener, M., Partl, M. N., et Morant, M. (2014). Cold asphalt recycling with 100% reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators. *Road materials and pavement design*, 15(2), 239-258.
- Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook* (pp. 744-747). London, UK:: Shell Bitumen.
- IDRRIM. (2021). *Recyclage des agrégats d'enrobé dans les mélanges, état de l'art et recommandations* (juillet 2021). Bron : Cerema. Collection : Références. ISBN 978-2-37180-528-6.

- Institut für Materialprüfung. (2024). *Essais sur bitumes*. IMP.
- Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I., & Zaumanis, M. J. P. E. (2015). Hot mix asphalt with high RAP content. *Procedia Engineering*, 114, 676-684.
- Javilla, B., Fang, H., Mo, L., Shu, B., & Wu, S. (2017). Test evaluation of rutting performance indicators of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 155, 1215-1223.
- Kandhal, P. S., & Chakraborty, S. (1996). Effect of asphalt film thickness on short-and long-term aging of asphalt paving mixtures. *Transportation Research Record*, 1535(1), 83-90.
- Kanou, T., Nitta, H., Sasaki, I., Kawakami, A., et Kubo, K. (2010). Highly-aged and highly-modified asphalt concrete recycling in Japan. In *11th International Conference on Asphalt Pavements* (Vol. 2010).
- Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E., & Martin, A. E. (2019). A method to quantify reclaimed asphalt pavement binder availability (effective RAP binder) in recycled asphalt mixes. *Transportation Research Record*, 2673(1), 205-216.
- Kida, K., et Kawahigashi, M. (2015). Influence of asphalt pavement construction processes on urban soil formation in Tokyo. *Soil science and plant nutrition*, 61(sup1), 135-146.
- Kim, S. S. (2005). Direct measurement of asphalt binder thermal cracking. *Journal of materials in civil engineering*, 17(6), 632-639.
- Kodippily, S., Holleran, I., & Holleran, G. (2016). Characterising bitumen binders for pavements in the Auckland region. *Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*, 25(4), 27-38.
- Kristjánssdóttir, Ó., Muench, S. T., Michael, L., et Burke, G. (2007). Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption. *Transportation Research Record*, 2040(1), 91-99.
- Kubo, K., et Leader, P. T. (2014). Recycling in Japan. *Application of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Hot-Mix Asphalt*, Vols. TR Circular E-C188, 60-66.
- Lachance-Tremblay, É., Vaillancourt, M., Perraton, D., & Di Benedetto, H. (2020). Linear viscoelastic (LVE) properties of asphalt mixtures with different glass aggregates and hydrated lime content. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(10), 1170-1179.

- Lamothe, S. (2004). *Enrobé grenu: influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-orniérage* (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure).
- Lamothe, S., Perraton, D., & Di Benedetto, H. (2016). Deterioration of HMA partially saturated with water or brine subjected to freeze-thaw cycles. In *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials* (pp. 705-717). Springer Netherlands.
- Larsen, O. R., Moen, Ø., Robertus, C., et Koenders, B. G. (2004). WAM Foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA. In *3rd Eurasphalt et Eurobitume Congress, Vienna*.
- Leclerc, A-M. (2010). *Comparaison des coûts de construction routière entre le Québec, l'Ontario et le Nouveau-Brunswick*. 4P-74 : Communiqué de presse, extrait concernant une étude.
- Leclerc, G. (2018). *Sélection des bitumes basée sur l'essai MSCR*. Communication présentée au 24^e Congrès INFRA, Québec, Canada
- Leiva-Villacorta, F., Taylor, A., & Willis, R. (2017). High-modulus asphalt concrete (HMAC) mixtures for use as base course. *National Center for Asphalt Technology Report*, 17-04.
- Leiva, F., & West, R. C. (2008). Analysis of hot-mix asphalt lab compactability using lab compaction parameters and mix characteristics. *Transportation Research Record*, 2057(1), 89-98.
- Lescaroux, F., et Mignon, V. (2008). Déterminants du prix du pétrole et impacts sur l'économie. *Revue française d'économie*, 23(2), 179-214.
- Li, N., Tang, W., Yu, X., Zhan, H., Wang, X., & Wang, Z. (2022). Laboratory investigation on blending process of reclaimed asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 325, 126793.
- Li, X., Gibson, N., Andriescu, A., & S. Arnold, T. (2017). Performance evaluation of REOB-modified asphalt binders and mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup1), 128-153.
- Li, X. J., & Marasteanu, M. O. (2010). Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental mechanics*, 50(7), 867-876.

- Li, X., Marasteanu, M. O., Williams, R. C., & Clyne, T. R. (2008). Effect of reclaimed asphalt pavement (proportion and type) and binder grade on asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2051(1), 90-97.
- Ling, M., Chen, Y., Hu, S., Luo, X., & Lytton, R. L. (2019). Enhanced model for thermally induced transverse cracking of asphalt pavements. *Construction and building materials*, 206, 130-139.
- Liu, Y., You, Z., Dai, Q., & Mills-Beale, J. (2011). Review of advances in understanding impacts of mix composition characteristics on asphalt concrete (AC) mechanics. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4), 385-405.
- Lo Presti, D., Vasconcelos, K., Orešković, M., Pires, G. M., & Bressi, S. (2020). On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. *Road Materials and Pavement Design*, 21(8), 2071-2090.
- Ma, X., Leng, Z., Wang, L., & Zhou, P. (2020). Effect of reclaimed asphalt pavement heating temperature on the compactability of recycled hot mix asphalt. *Materials*, 13(16), 3621.
- Ma, Y., Polaczyk, P., Hu, W., Zhang, M., & Huang, B. (2021). Quantifying the effective mobilized RAP content during hot in-place recycling techniques. *Journal of Cleaner Production*, 314, 127953.
- Majidzadeh, K., & Schweyer, H. E. (1968). Viscoelastic response of aged asphalt cements. *Hwy. Res. Record*, 231, 50-61.
- Mangiafico, S., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Olard, F., Pouget, S., & Planque, L. (2014). New method to obtain viscoelastic properties of bitumen blends from pure and Reclaimed Asphalt Pavement binder constituents. *Road Materials and Pavement Design*, 15(2), 312-329.
- Mangiafico, S., Sauzéat, C., & Di Benedetto, H. (2019a). 2S2P1D model calibration error from user panel for one bitumen and one bituminous mixture. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.
- Mangiafico, S., Sauzéat, C., & Di Benedetto, H. (2019b). Comparison of different blending combinations of virgin and RAP-extracted binder: Rheological simulations and statistical analysis. *Construction and Building Materials*, 197, 454-463.
- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Karim, M. R., & Abdelaziz, M. (2011). Effect of crumb rubber concentration on the physical and rheological properties of rubberised bitumen binders. *International journal of the physical sciences*, 6(4), 684-690.

- Maupin, G. W., Diefenderfer, S. D., & Gillespie, J. S. (2008). *Evaluation of using higher percentages of recycled asphalt pavement in asphalt mixes in Virginia* (No. VTRC 08-R22). Virginia Transportation Research Council.
- McDaniel, R. S., et Anderson, R. M. (2001a). NCHRP Report 452: Recommended Use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual. *TRB, National Research Council, Washington, DC*.
- McDaniel, R. S., & Anderson, R. M. (2001b). *Recommended use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave mix design method: Technician's manual*. No. Project D9-12 FY'97. National Research Council (US). Transportation Research Board.
- McDaniel, R. S., Soleymani, H., Anderson, R. M., Turner, P., & Peterson, R. (2000). Incorporation of reclaimed asphalt pavement in the Superpave system. *NCHRP Rep*, (9-12).
- McDaniel, R. S., Soleymani, H., & Shah, A. (2002). Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) under Superpave specifications. *Washington, DC: Federal Highway Administration (FHWA/IN/JTRP-2002/6)*.
- Meroni, F., Flintsch, G. W., Habbouche, J., Diefenderfer, B. K., & Giustozzi, F. (2021). Three-level performance evaluation of high RAP asphalt surface mixes. *Construction and Building Materials*, 309, 125164.
- Mikhailenko, P., Bertron, A., & Ringot, E. (2016). Methods for analysing the chemical mechanisms of bitumen aging and rejuvenation with FTIR spectrometry. In *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials* (pp. 203-214). Springer, Dordrecht.
- Miliutenko, S., Björklund, A., et Carlsson, A. (2013). Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden. *Journal of cleaner production*, 43, 156-165.
- Modarres, A., et Hamed, H. (2014). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials et Design*, 61, 8-15.
- Moghaddam, T. B., Karim, M. R., & Abdelaziz, M. (2011). A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *Scientific Research and Essays*, 6(4), 670-682.
- Molenaar, A., et Mohajeri, M. (2014). Hot recycling in the Netherlands. *Application of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Hot-Mix Asphalt*, 28.
- MTMD. (2020). *Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées*. Norme 4202. Québec: ministère des Transports du Québec.

- MTMD. (2023a). *Bitumes*. Norme 4101. Québec: ministère des Transports du Québec.
- MTMD. (2023b). Granulats. Norme 2101, éd. 2017-12-15, Québec (Qc): Ministère des Transports du Québec, 5p.
- MTMD. (2023c). Recueil des méthodes d'essai LC, éd. 2023-12-15, Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec
- MTQ, (2016), *Bilan de l'état des chaussées du réseau routier supérieur Québécois*, ISBN : 978-2-550-79286-4.
- Mukandila, E. M., Steyn, W. J. V. D. M., & Milne, T. I. (2018). Modelling of cohesion and adhesion damage of seal based on dynamic shear rheometer testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(9), 786-797.
- Nener-Plante, D., Nash, C., & Robinson, J. R. (2023). Impacts of Ignition Furnace Correction Factor Errors on Quality Assurance of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record*, 03611981231187384.
- Nguyen, V. H. (2009). *Effects of laboratory mixing methods and RAP materials on performance of hot recycled asphalt mixtures* (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
- Nivitha, M. R., Prasad, E., & Krishnan, J. M. (2016). Ageing in modified bitumen using FTIR spectroscopy. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(7), 565-577.
- Noferini, L., Simone, A., Sangiorgi, C., & Mazzotta, F. (2017). Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(4), 322-332.
- Norton, A., Reger, D., DuBois, E., Kehr, D., Nolan, A., & Mehta, Y. (2014). A study to evaluate low temperature performance of Reclaimed Asphalt Pavement in hot mix asphalt at different degrees of blending. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 39(4), 234-243.
- Nsengiyumva, G. (2015). Development of semi-circular bending (SCB) fracture test for bituminous mixtures.
- Olard, F. (2003). *Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé* (Thèse de doctorat, INSA de Lyon).

- Olard, F., & Di Benedetto, H. (2003). General “2S2P1D” model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. *Road materials and pavement design*, 4(2), 185-224.
- Olard, F., Di Benedetto, H., Dony, A., & Vaniscote, J. C. (2005). Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics. *Materials and structures*, 38, 121-126.
- Oliver, J. W. (2009). Changes in the chemical composition of Australian bitumens. *Road Materials and Pavement Design*, 10(3), 569-586.
- Ozer, H., Al-Qadi, I., Carpenter, S., Aurangzeb, Q., Roberts, G., et Trepanier, J. (2009). Evaluation of RAP impact on hot-mix-asphalt design and performance. *Asphalt Paving Technology-Proceedings*, 28, 317.
- Paliukaite, M., Vaitkus, A., & Zofka, A. (2014). Evaluation of bitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology. In *Environmental engineering. Proceedings of the international conference on environmental engineering. ICEE* (Vol. 9, p. 1). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property.
- Pedraza, A. (2018). *Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés* (Thèse de doctorat, Université de Lyon). Repéré à HAL theses (01799561).
- Perraton, D. (2013). CTN 404: science et technologie des matériaux. École de technologie supérieure.
- PIARC. (2015). Canada - national report, Infrastructure, optimizing road infrastructure investments and accountability, *XXVth world road congress*, Seoul.
- Pinheiro, G., Vasconcelos, K., & Bernucci, L. (2022). Reclaimed asphalt pavement binder extraction and recovery evaluation and their effects on the recycling agent assessment. *Transportation Research Record*, 2676(11), 707-721.
- Pokorski, P., Radziszewski, P., & Sarnowski, M. (2015). Rheological properties of asphalt mixtures for bridge pavements. *Procedia Engineering*, 111, 637-644.
- Pszczola, M., Jaczewski, M., Rys, D., Jaskula, P., & Szydlowski, C. (2018). Evaluation of asphalt mixture low-temperature performance in bending beam creep test. *Materials*, 11(1), 100.
- Québec, B. (2009). Le recyclage des enrobés bitumineux. *Bulletin technique. Bitume Québec, Techno-bitume, Québec*.

- Radeef, H. R., Hassan, N. A., Abidin, A. R. Z., Mahmud, M. Z. H., Yaacob, H., Mashros, N., & Mohamed, A. (2021). Effect of aging and moisture damage on the cracking resistance of rubberized asphalt mixture. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2853-2858.
- Ramli, M. I., Pasra, M., & Amiruddin, A. A. (2020). The sustainable performance challenge of asphalt mixture using polypropylene due to environmental weather. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 419, No. 1, p. 012075). IOP Publishing.
- Roque, R., Zhang, Z., & Sankar, B. (1999). Determination of crack growth rate parameter of asphalt mixtures using the superpave IDT. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 68.
- Rowe, G. M., Sharrock, M. J., Bouldin, M. G., & Dongre, R. N. (2001). Advanced technique to develop asphalt master curves from the bending beam rheometer. *Petroleum and Coal*, 43(1), 54-59.
- Saliani, S. S., Carter, A., Baaj, H., & Tavassoti, P. (2019). Characterization of asphalt mixtures produced with coarse and fine recycled asphalt particles. *Infrastructures*, 4(4), 67.
- Salim, R., Gundla, A., Underwood, B. S., & Kaloush, K. E. (2019). Effect of MSCR percent recovery on performance of polymer modified asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2673(5), 308-319.
- Saha, R., Karki, B., Berg, A., Melaku, R. S., & Gedafa, D. S. (2017). Effect of RAP on cracking and rutting resistance of HMA mixes. In *Airfield and Highway Pavements 2017* (pp. 86-94).
- Shen, J., & Ohne, Y. (2002). Determining rejuvenator content for recycling reclaimed asphalt pavement by SHRP binder specifications. *International Journal of Pavement Engineering*, 3(4), 261-268.
- Shirodkar, P., Mehta, Y., Nolan, A., Dubois, E., Reger, D., & McCarthy, L. (2013). Development of blending chart for different degrees of blending of RAP binder and virgin binder. *Resources, conservation and recycling*, 73, 156-161.
- Shu, X., Huang, B., et Vukosavljevic, D. (2008). Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1323-1330.
- Singh, D., Showkat, B., & Girimath, S. (2020). Effect of Recycled Asphalt Pavement Binder on Rheology of Crumb Rubber-Modified Binder—An Experimental, Analytical, and Analogical Study. *Advances in Civil Engineering Materials*, 9(1), 643-665.

- Skidmore, H. W. (1936). Some low-temperature characteristics of bituminous paving compositions. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 101(1), 1135-1150.
- Smeed, R. J. (1949). Some statistical aspects of road safety research. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 112(1), 1-34.
- Sreeram, A., & Leng, Z. (2019). Variability of rap binder mobilisation in hot mix asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 201, 502-509.
- Taniguchi, S., Nishizaki, I., & Moriyoshi, A. (2008). A study of longitudinal cracking in asphalt pavement using CT scanner. *Road materials and pavement design*, 9(3), 549-558.
- Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review. *Materials*, 13(18), 4052.
- Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2018). Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Construction and Building Materials*, 192, 593-609.
- Tayfur, S., Ozen, H., & Aksoy, A. (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 21(2), 328-337.
- Teltayev, B. (2014). Evaluation of low temperature cracking indicators of hot mix asphalt pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 7(5), 343.
- Theophanides, T. (2012). Introduction to infrared spectroscopy. *Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology*, 1-10.
- Timm, D. H., Robbins, M. M., Willis, J. R., Tran, N., & Taylor, A. J. (2009). Evaluation of Mixture Performance and Structural Capacity of Pavements Utilizing Shell Thiopave®. *Phase II: Construction, Laboratory Evaluation and Full-Scale Testing of Thiopave® Test Sections—One Year Report 2011* Available online: <http://www.ncat.us/files/reports/2011/rep11-03.pdf> (accessed on 29 July 2011).
- Topal, A., Oner, J., Sengoz, B., Dokandari, P. A., & Kaya, D. (2017). Evaluation of rutting performance of warm mix asphalt. *International Journal of Civil Engineering*, 15, 705-714.
- Traxler, R. N. (1936). The Physical Chemistry of Asphaltic Bitumen. *Chemical reviews*, 19(2), 119-143.

- Trudeau, S. (2003). *La sélection et les caractéristiques des liants d'accrochage* présentée à Bitume Québec, Montréal, Québec, Canada.
- Vassaux, S. (2017). *Mouillabilité et miscibilité des bitumes: application au recyclage* (Doctoral dissertation, Université Montpellier).
- Visintine, B. (2011). An Investigation of Various Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement on the Performance of Asphalt Pavements.
- Visintine, B., Khosla, N. P., & Tayebali, A. (2013). Effects of higher percentage of recycled asphalt pavement on pavement performance. *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), 432-437.
- Wang, W., Cheng, H., Sun, L., Sun, Y., & Liu, N. (2022). Multi-performance evaluation of recycled warm-mix asphalt mixtures with high reclaimed asphalt pavement contents. *Journal of Cleaner Production*, 134209.
- Weigel, S., & Stephan, D. (2017). The prediction of bitumen properties based on FTIR and multivariate analysis methods. *Fuel*, 208, 655-661.
- Weigel, S., & Stephan, D. (2018). Bitumen characterization with Fourier Transform Infrared Spectroscopy and multivariate evaluation: prediction of various physical and chemical parameters. *Energy & fuels*, 32(10), 10437-10442.
- White, G. W. (2016). Changes in Australian Paving-Grade Bitumen: Are they real and what should Australia do about it?. In *Proceedings of the ARRB Annual Conference* (pp. 1-12). ARRB Group.
- Williams, M. L., Landel, R. F., & Ferry, J. D. (1955). The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of the American Chemical society*, 77(14), 3701-3707.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications. *Construction and Building Materials*, 69, 159-166.
- Willis, J. R., et West, R. (2014). Current Status of Reclaimed Asphalt Pavement Application in the United States. *Application of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Hot-Mix Asphalt*, 3.
- Wu, J., Liu, Q., Wang, Y., Chen, J., Wang, D., Xie, L., & Ago, C. (2018). Effect of mixing time and temperature on the homogeneity of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement material. *Transportation Research Record*, 2672(28), 167-177.

- Wu, W., Cavalli, M. C., Jiang, W., & Kringos, N. (2024). Differing perspectives on the use of high-content SBS polymer-modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 411, 134433.
- Yan, C., Zhang, Y., & Bahia, H. U. (2020). Comparison between SCB-IFIT, un-notched SCB-IFIT and IDEAL-CT for measuring cracking resistance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 252, 119060.
- Yang, J., Sun, C., Tao, W., Gao, J., Huang, B., & Zhang, J. (2021). Laboratory investigation of compaction characteristics of plant recycled hot-mix asphalt mixture. *Sustainability*, 13(6), 3005.
- Yildirim, Y., Solaimanian, M., & Kennedy, T. W. (2000). *Mixing and compaction temperatures for hot mix asphalt concrete* (No. 1250-5). University of Texas at Austin. Center for Transportation Research.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230-245.
- Zaumanis, M., & Mallick, R. B. (2015). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), 39-55.
- Zaumanis, M., Oga, J., & Haritonovs, V. (2018). How to reduce reclaimed asphalt variability: A full-scale study. *Construction and Building Materials*, 188, 546-554.
- Zeida, W., Liu, H., Ezzat, H., Al-Khateeb, G. G., Underwood, B. S., Shanableh, A., & Samarai, M. (2022). Review of the Superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization. *Construction and Building Materials*, 319, 126063.
- Zenke, G. (1976). On the use of polymer-modified bitumen in asphalt mixes. *Stationaere Mischwerk*, 10(6).
- Zhao, S., Huang, B., & Shu, X. (2015). Investigation on binder homogeneity of RAP/RAS mixtures through staged extraction. *Construction and Building Materials*, 82, 184-191.
- Zhou, F., Im, S., Sun, L., & Scullion, T. (2017). Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup4), 405-427.
- Zoorob, S. E., Castro-Gomes, J. P., Oliveira, L. P., & O'connell, J. (2012). Investigating the multiple stress creep recovery bitumen characterisation test. *Construction and Building Materials*, 30, 734-745.